

CONTRIBUTOS PARA A VERIFICAÇÃO DAS CONDIÇÕES DE SEGURANÇA EM VERTENTES ÍNGREMES DE FORMAÇÕES ROCHOSAS COM POSSIBILIDADE DE DESTACAMENTO DE BLOCOS

MARIANA SILVA SOARES DE MELO

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de
MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM GEOTECNIA

Orientador: Professor Engenheiro Celso Manuel Relva Martins de
Lima

JUNHO DE 2018

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2017/2018

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446

✉ miec@fe.up.pt

Editado por

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-508 1440

✉ feup@fe.up.pt

🌐 <http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado Integrado em Engenharia Civil - 2017/2018 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2018*.

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respetivo Autor, não podendo o Editor aceitar qualquer responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões que possam existir.

Este documento foi produzido a partir de versão eletrónica fornecida pelo respetivo Autor.

À minha família

AGRADECIMENTOS

Com a conclusão desta dissertação, no final destes cinco anos, seguem-se alguns agradecimentos às pessoas que me acompanharam neste percurso.

Ao professor Celso Lima e orientador desta dissertação, pela ajuda, disponibilidade e atenção que teve a este trabalho ao longo do semestre.

A todos os professores por partilharem o seu conhecimento ao longo destes anos, especialmente aos professores da especialidade de Geotecnia, por nos incentivarem e cativarem durante este último ano.

Aos meus pais, família e amigos que me acompanharam neste percurso, por todo o apoio e encorajamento.

Aos meus colegas de Geotecnia, por todas as horas de estudo, trabalho e diversão passadas na nossa sala.

Por fim, à FEUP, por tornar tudo isto possível.

RESUMO

A queda de blocos em taludes rochosos é um tipo de instabilidade que pode provocar danos materiais ou humanos. É, portanto, de grande importância a redução deste risco através de medidas de estabilização e/ou de proteção.

Tendo isto em conta, são apresentadas na presente dissertação possíveis soluções contra a queda de blocos para um talude rochoso na barragem de Foz Tua. Estas soluções de proteção são baseadas em simulações da queda de blocos com recurso ao programa informático *Rocfall*. Através de informação sobre a trajetória dos blocos obtida no programa, foram dimensionadas as soluções para o talude em estudo. Foram realizadas análises paramétricas para avaliar a influência de diferentes propriedades do talude e dos blocos neste tipo de instabilidade.

Nos capítulos iniciais são apresentadas as características dos maciços rochosos de que depende o destacamento de blocos, assim como os tipos de instabilidades que ocorrem em taludes, e as respetivas medidas de estabilização e proteção, com destaque para as medidas de proteção contra a queda de blocos, nomeadamente a colocação de barreiras flexíveis. É neste tipo de proteção que se baseiam as soluções apresentadas nos capítulos finais.

PALAVRAS-CHAVE: taludes rochosos, queda de blocos, estabilização, barreira flexível, *Rocfall*

ABSTRACT

Rockfall in rock slopes is a type of instability that can cause material or human damages. Thus, it's of great importance the reduction of this risk through stabilization and/or protection measures.

With this in mind, possible solutions for rockfall occurrences on a slope in the Foz Tua dam are presented in this thesis. These solutions are based on simulations of rockfalls using the program *Rocfall*. Through information obtained in the program about the trajectory of the blocks, the solutions for the slope under study were dimensioned. Parametric analyses were performed to evaluate the influence of different slope and block properties in this type of instability.

In the initial chapters the characteristics of rock massifs on which the detachment of rocks depend are presented, as well as the types of instabilities that can occur in slopes, and the respective stabilization and protection measures, with emphasis on the protection measures against rockfall, particularly the installation of flexible barriers. It is in this type of protection that the solutions presented in the final chapters are based.

KEYWORDS: rock slopes, rockfall, stabilization, flexible barrier, *Rocfall*

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS	i
RESUMO	iii
ABSTRACT	v

1. INTRODUÇÃO	1
1.1. ENQUADRAMENTO	1
1.2. ESTRUTURA DA TESE.....	1

2. CARACTERIZAÇÃO DE MACIÇOS ROCHOSOS	3
2.1. INTRODUÇÃO	3
2.2. TIPOS DE DESCONTINUIDADES.....	3
2.3. CARACTERIZAÇÃO DAS DESCONTINUIDADES	5
2.4. CLASSIFICAÇÃO DE MACIÇOS ROCHOSOS	15

3. PRINCIPAIS TIPOS DE INSTABILIDADE EM TALUDES	17
3.1. INTRODUÇÃO	17
3.2. TIPOS DE INSTABILIDADE	18
3.2.1. ROTURA CIRCULAR	18
3.2.2. ROTURA PLANA.....	19
3.2.3. ROTURA POR CUNHAS	19
3.2.4. ROTURA POR <i>TOPPLING</i>	20
3.2.5. CORRENTES DE DETRITOS	21
3.2.6. DESTACAMENTO DE BLOCOS	22

4. ESTABILIZAÇÃO DE TALUDES	25
4.1. INTRODUÇÃO	25
4.2. ANÁLISE DA ESTABILIDADE DE TALUDES	25
4.3. ESTABILIZAÇÃO DE TALUDES	26
4.3.1. ALTERAÇÃO DA GEOMETRIA DO TALUDE	27

4.3.2. OBRAS DE CONTENÇÃO	28
4.3.3. ELEMENTOS ESTRUTURAIS RESISTENTES.....	29
4.3.4. SISTEMAS DE DRENAGEM.....	29
4.4. MEDIDAS DE ESTABILIZAÇÃO CONTRA CORRENTES DE DETRITOS	30
4.5. MEDIDAS DE ESTABILIZAÇÃO CONTRA DESPRENDIMENTO DE BLOCOS	31
4.5.1. ESTABILIZAÇÃO ATRAVÉS DA REMOÇÃO DE BLOCOS	31
4.5.2. ESTABILIZAÇÃO ATRAVÉS DO REFORÇO DE BLOCOS	32
4.5.3. MEDIDAS DE PROTEÇÃO	35
4.5.3.1. Valas no pé de talude.....	36
4.5.3.2. Redes metálicas	38
4.5.3.3. Barreiras rígidas	40
4.5.3.4. Barreiras flexíveis	43
4.5.3.5. Atenuadores	45
4.5.3.6. Abrigos e coberturas	45
4.6. AVALIAÇÃO DO RISCO DO DESPRENDIMENTO DE BLOCOS.....	49
 5. SOFTWARE DE SIMULAÇÃO DA QUEDA DE BLOCOS	 51
5.1. INTRODUÇÃO	51
5.2. PARÂMETROS CONSIDERADOS NA SIMULAÇÃO DA QUEDA DE BLOCOS	52
5.2.1. COEFICIENTE DE RESTITUIÇÃO	52
5.2.2. ÂNGULO DE ATRITO	55
5.2.3. RUGOSIDADE	55
5.2.4. MASSA E DENSIDADE DOS BLOCOS.....	56
5.2.5. TAMANHO E FORMA DOS BLOCOS	56
5.3. PARTICULARIDADES DO MÉTODO DE ANÁLISE <i>RIGID BODY</i>	57
5.4. DIMENSIONAMENTO DE BARREIRAS FLEXÍVEIS	58
5.4.1. ALTURA DE RESSALTO	58
5.4.2. ENERGIA CINÉTICA	58
 6. CASO DE ESTUDO	 63
6.1. ENQUADRAMENTO	63
6.2. MODELAÇÃO	64
6.2.1. RESULTADOS.....	66

6.2.1.1. Trajetória dos blocos	66
6.2.1.2. Alturas de ressalto	67
6.2.1.3. Velocidades	67
6.2.1.4. Energia cinética	68
6.2.2. DIMENSIONAMENTO DA SOLUÇÃO	71
6.3. ESTUDOS PARAMÉTRICOS	74
6.3.1. COEFICIENTE DE RESTITUIÇÃO	75
6.3.1.1. Coeficiente de restituição normal	75
6.3.1.2. Coeficiente de restituição tangencial	78
6.3.2. ÂNGULO DE ATRITO	82
6.3.3. MASSA DOS BLOCOS	84
6.3.4. PRESENÇA DE VEGETAÇÃO	86
6.3.5. INFLUÊNCIA DO NÚMERO DE BLOCOS DESPRENDIDOS	89
6.3.6. ANÁLISES DE SENSIBILIDADE	90
6.3.7. ANÁLISE COM O MODELO DO CORPO RÍGIDO	93
6.3.7.1. Blocos esféricos e cúbicos	96
6.4. VERIFICAÇÃO DA SOLUÇÃO	99
6.5. CONSIDERAÇÕES FINAIS	101
 7. CONCLUSÃO	 103
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	105

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Exemplo de uma descontinuidade do tipo falha num maciço rochoso (Brasil Escola, 2018)	4
Figura 2 - Exemplo de uma descontinuidade do tipo diáclase num maciço rochoso (Wikimedia Commons, 2018)	5
Figura 3 - Representações simples e blocos-diagrama para exemplificar a continuidade relativa de várias famílias de descontinuidades (Lima, Menezes e Topa Gomes, 2012)	6
Figura 4 - Representação esquemática de maciços rochosos: a) blocos paralelepípedicos; b - blocos irregulares; c - blocos tabulares; d - blocos colunares (Lima, Menezes e Topa Gomes, 2012)	9
Figura 5 - Exemplos de preenchimento de descontinuidades: descontinuidade fechada, aberta e preenchida (Lima, Menezes e Topa Gomes, 2012)	11
Figura 6 - Perfis típicos de rugosidade (Lima, Menezes e Topa Gomes, 2012)	12
Figura 7 - Exemplo de representação da orientação de descontinuidades	13
Figura 8 - Círculo maior e polos definidores da orientação de um plano, e representação do plano N40W,40SW (Lima, Menezes e Topa Gomes, 2012)	14
Figura 9 - Representação de diferentes famílias de descontinuidades no programa <i>DIPS</i>	14
Figura 10 - Exemplo do tipo de instabilidade de rotura circular e respetiva representação estereográfica (Lima, Menezes e Topa Gomes, 2012)	18
Figura 11 - Exemplo do tipo de instabilidade de rotura plana e respetiva representação estereográfica (Lima, Menezes e Topa Gomes, 2012)	19
Figura 12 - Exemplo do tipo de instabilidade de rotura por cunhas e respetiva representação estereográfica (Lima, Menezes e Topa Gomes, 2012)	20
Figura 13 - Exemplo do tipo de instabilidade de rotura por <i>toppling</i> e respetiva representação estereográfica (Lima, Menezes e Topa Gomes, 2012)	20
Figura 14 - Exemplo do tipo de instabilidade de correntes de detritos (The Landslide Blog, 2018)	21
Figura 15 - Exemplo das consequências do desprendimento de blocos	22
Figura 16 - Diferentes tipos de movimento dos blocos em função da inclinação do talude (adaptado de Ritchie, 1963)	24
Figura 17 - Alteração da geometria do talude através da remoção de peso no topo e adição na base	27
Figura 18 - Influência na trajetória dos blocos da presença de banquetas em taludes (Luis Fonseca, 2010)	28
Figura 19 - Exemplo de um muro de gabião (www.encuentra24.com, 2018)	28
Figura 20 - Esquema pormenorizado de uma ancoragem (Matos Fernandes, 2011)	29
Figura 21 - Talude com diferentes medidas de estabilização: alteração da geometria do talude, drenagem superficial e profunda, ancoragens e revestimento com vegetação (Matos Fernandes, 2011)	30
Figura 22 - Exemplo de uma barreira flexível para proteção contra correntes de detritos (www.geoverticalsrl.com, 2018)	31
Figura 23 - Talude com possibilidade de destacamento de blocos com diferentes medidas de estabilização através da remoção de blocos (Soeters e van Westen, 1996)	32
Figura 24 - Talude com possibilidade de destacamento de blocos com diferentes medidas de estabilização através do reforço de blocos (Soeters e van Westen, 1996)	33
Figura 25 - Estabilização de um bloco instável com recurso a contrafortes (canto inferior esquerdo), Rio de Janeiro (Ortigao e Sayao, 2013)	34
Figura 26 - Esquema de uma vala no pé do talude	36
Figura 27 - Diagrama para dimensionamento de valas em função da altura e inclinação do talude (Ritchie, 1963)	37
Figura 28 - Exemplo de uma rede suspensa (Geobrug, 2018)	38
Figura 29 - Esquemas de redes suspensas (Geobrug, 2018)	39
Figura 30 - Esquema representativo do funcionamento de uma rede pregada (adaptado de Wyllie, 2015)	39
Figura 31 - Exemplo de duas medidas de proteção contra o desprendimento de blocos: vala no pé do talude e muro de gabião (adaptado de Wyllie, 2015)	40
Figura 32 - Exemplo de uma barreira rígida metálica (www.hitechrockfall.com, 2018)	41
Figura 33 - Esquema de uma barreira do tipo MSE (adaptado de Wyllie, 2015)	42

Figura 34 - Esquema de uma barreira do tipo MSE protegida com sacos de areia (adaptado de Wyllie, 2015).....	42
Figura 35 - Exemplo de um talude com instalação de barreiras flexíveis (Geobrug, 2018)	43
Figura 36 - Esquema de uma barreira flexível (adaptado de Wyllie, 2015)	44
Figura 37 - Esquema de uma base articulada (Luis Fonseca, 2010)	44
Figura 38 - Exemplo de um abrigo contra queda de blocos, ou <i>rock shed</i> (Wikimedia commons, 2018)	46
Figura 39 - Esquema de dois abrigos contra queda de blocos: túnel falso (esquerda) e abrigo encastrado (direita) (adaptado de Wyllie, 2015)	47
Figura 40 - Exemplo de um abrigo encastrado (Wyllie, 2015)	47
Figura 41 - Exemplo de uma cobertura contra queda de blocos (Geobrug, 2018).....	48
Figura 42 - Valores dos coeficientes de restituição normal e tangencial para diferentes tipos de talude (adaptado de Rocscience, 2018).....	54
Figura 43 - Valores do coeficiente da resistência ao rolamento para diferentes tipos de talude (adaptado de Rocscience, 2018).....	57
Figura 44 - Alguns exemplos de diferentes tipos de barreiras flexíveis disponíveis no mercado (Geobrug, 2018)	60
Figura 45 - Diferentes tipos de barreiras flexíveis disponíveis no programa <i>Rocfall</i>	60
Figura 46 - Barragem de Foz Tua (EDP, 2018)	63
Figura 47 - Talude em estudo, barragem de Foz Tua (Celso Lima, 2018).....	64
Figura 48 - Perfil transversal do talude em estudo, no programa <i>Rocfall</i>	65
Figura 49 - Resultado da simulação da trajetória de um bloco ao longo do talude em estudo	66
Figura 50 - Alturas de ressalto do bloco desprendido ao longo do perfil transversal do talude em estudo	67
Figura 51 - Velocidades de translação do bloco desprendido ao longo do perfil transversal do talude em estudo	68
Figura 52 - Velocidades de rotação do bloco desprendido ao longo do perfil transversal do talude em estudo	68
Figura 53 - Energias cinéticas de translação do bloco desprendido ao longo do perfil transversal do talude em estudo	69
Figura 54 - Energias cinéticas de rotação do bloco desprendido ao longo do perfil transversal do talude em estudo	69
Figura 55 - Energias cinéticas totais do bloco desprendido ao longo do perfil transversal do talude em estudo	70
Figura 56 - Resultado da simulação da trajetória de dez blocos desprendidos de um único ponto do talude em estudo	70
Figura 57 - Simulação da solução para a queda de dez blocos desprendidos de um único ponto do talude em estudo	71
Figura 58 - Distribuição da energia cinética total dos blocos com a solução da barreira flexível.....	72
Figura 59 - Resultado da simulação da trajetória de cem blocos desprendidos ao longo de todo o perfil transversal do talude em estudo.....	72
Figura 60 - Simulação da solução para a queda de cem blocos desprendidos ao longo de todo o perfil transversal do talude em estudo (uma barreira)	73
Figura 61 - Simulação da solução para a queda de cem blocos desprendidos ao longo de todo o perfil transversal do talude em estudo (duas barreiras).....	74
Figura 62 - Influência do coeficiente de restituição normal na trajetória dos blocos, da esquerda para a direita: $R_n=0.25, 0.35$ e 0.45	75
Figura 63 - Variação das alturas de ressalto com o coeficiente de restituição normal	76
Figura 64 - Variação da energia cinética com o coeficiente de restituição normal	76
Figura 65 - Simulação da solução para o caso mais desfavorável ($R_n=0.45$)	77
Figura 66 - Alternativa de solução para o caso mais desfavorável ($R_n=0.45$)	78
Figura 67 - Influência do coeficiente de restituição tangencial na trajetória dos blocos, da esquerda para a direita: $R_t=0.8, 0.85$ e 0.9	78
Figura 68 - Variação das alturas de ressalto com o coeficiente de restituição tangencial	79
Figura 69 - Variação da energia cinética com o coeficiente de restituição tangencial	80
Figura 70 - Simulação da solução para o caso do coeficiente de restituição tangencial igual a 0.9	80
Figura 71 - Alternativa de solução para o caso do coeficiente de restituição tangencial igual a 0.9	81
Figura 72 - Simulação da solução para o caso do coeficiente de restituição tangencial igual a 0.8	82

Figura 73 - Influência do coeficiente de restituição tangencial na trajetória dos blocos, da esquerda para a direita: $\varphi=27^\circ$, $\varphi=30^\circ$ e $\varphi=35^\circ$	82
Figura 74 - Variação das alturas de ressalto com o ângulo de atrito.....	83
Figura 75 - Variação da energia cinética com o ângulo de atrito.....	83
Figura 76 - Variação das alturas de ressalto com a massa dos blocos.....	84
Figura 77 - Variação da energia cinética com a massa dos blocos.....	85
Figura 78 - Simulação da solução para o caso da massa dos blocos igual a 5000 kg (barreira com capacidade insuficiente).....	85
Figura 79 - Perfil transversal do talude com revestimento de vegetação (secção intermédia)	86
Figura 80 - Resultado da simulação da queda de cem blocos ao longo de todo o perfil do talude, com revestimento de vegetação	87
Figura 81 - Variação das alturas de ressalto com a presença de vegetação	87
Figura 82 - Variação da energia cinética com a presença de vegetação	88
Figura 83 - Simulação da solução para o caso do talude com vegetação	88
Figura 84 - Resultado da simulação da queda de mil blocos ao longo de todo o perfil do talude, com revestimento de vegetação, com a solução do caso de cem blocos.....	89
Figura 85 - Análise de sensibilidade da primeira barreira: localização no perfil transversal do talude	90
Figura 86 - Detalhe da análise de sensibilidade da primeira barreira com a simulação da queda de blocos	90
Figura 87 - Localização preferencial da barreira no perfil transversal do talude	91
Figura 88 - Análise de sensibilidade da segunda barreira: inclinação.....	91
Figura 89 - Detalhe da análise de sensibilidade da segunda barreira com a simulação da queda de blocos	92
Figura 90 - Inclinação preferencial da segunda barreira	92
Figura 91 - Solução otimizada para o caso de mil blocos desprendidos.....	93
Figura 92 - Comparação das trajetórias dos blocos em função do método de análise; esquerda - <i>lumped mass</i> ; direita - <i>rigid body</i>	94
Figura 93 - Distribuições das alturas de ressalto com métodos de análise diferentes.....	94
Figura 94 - Distribuições de energia cinética com métodos de análise diferentes.....	95
Figura 95 - Solução para a simulação com o método de análise <i>rigid body</i>	95
Figura 96 - Alternativa de solução para a simulação com o método de análise <i>rigid body</i>	96
Figura 97 - Comparação das trajetórias dos blocos em função da forma dos blocos; esquerda - blocos esféricos; direita - blocos cúbicos	97
Figura 98 - Distribuições das alturas de ressalto com blocos de diferentes formas.....	97
Figura 99 - Distribuições de energia cinética com blocos de diferentes formas.....	98
Figura 100 - Simulação da solução para o caso de blocos cúbicos	99
Figura 101 - Verificação da primeira barreira (de cota superior) para o estado limite de serviço	99
Figura 102 - Verificação da segunda barreira (de cota inferior) para o estado limite de serviço	100
Figura 103 - Verificação da primeira barreira (de cota superior) para o caso da massa dos blocos igual a 5000 kg.....	100
Figura 104 - Verificação da segunda barreira (de cota inferior) para o método de análise do corpo rígido.....	100

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 1 - Designação de maciços rochosos em função das características das suas descontinuidades (Lima, Menezes e Topa Gomes, 2012)	8
Quadro 2 - Designação das dimensões dos blocos em função do índice volumétrico, J_v (Lima, Menezes e Topa Gomes, 2012)	10
Quadro 3 - Quadro para dimensionamento de valas em função da altura e inclinação do talude (Peckover e Kerr, 1977)	37
Quadro 4 - Valores dos coeficientes de restituição normal e tangencial para diferentes tipos de talude (Luis Fonseca, 2010)	54
Quadro 5 - Valores da densidade de diferentes rochas (Lima, Menezes e Topa Gomes, 2012)	56
Quadro 6 - Propriedades do talude e dos blocos desprendidos introduzidas no programa	66
Quadro 7 - Propriedades do talude coberto com vegetação	86
Quadro 8 - Propriedades do talude introduzidas no programa para a simulação através do modelo <i>rigid body</i>	93
Quadro 9 - Síntese das soluções de proteção	102

SÍMBOLOS, ACRÓNIMOS E ABREVIATURAS

ALFABETO LATINO

c' - coesão

I - momento de inércia

m - massa

R_n - coeficiente de restituição normal

R_t - coeficiente de restituição tangencial

\bar{s} - espaçamento médio entre duas descontinuidades

v - velocidade

V - volume dos blocos

ALFABETO GREGO

σ' - tensão normal

τ - tensão tangencial

ϕ' - ângulo de atrito do maciço

ψ - pendor das descontinuidades

ω - velocidade angular

SIGLAS E ACRÓNIMOS

EDP - Energias de Portugal

GSI - *Geological Strength Index*

IAGE - *International Association for Engineering Geology*

ISRM - *International Society for Rock Mechanics*

JRC - *Joint Roughness Coefficient*

MSE - *Mechanically stabilized earth*

RMR - *Rock Mass Rating*

RQD - *Rock Quality Designation*

1

INTRODUÇÃO

1.1. ENQUADRAMENTO

O destacamento de blocos acontece quando um maciço rochoso se encontra fraturado devido aos efeitos da erosão e meteorização, provocando descontinuidades que formam blocos de rocha que se podem desprender do maciço e cair. O desprendimento pode ser provocado por causas naturais, tais como os efeitos da erosão, a presença de água, ciclos gelo-degelo e ocorrência de sismos, ou por causas humanas, como escavações ou detonações noutras zonas do maciço.

A presente dissertação aborda as possíveis medidas de estabilização e proteção de taludes com possibilidade de destacamento de blocos, e posteriormente a simulação deste fenómeno e dimensionamento de estruturas protetoras, nomeadamente de barreiras flexíveis, através do programa *Rocfall*.

Procurou-se descobrir os parâmetros de que depende este tipo de instabilidade, e que influência têm no movimento dos blocos ao longo da sua queda, através de estudos paramétricos e análises de sensibilidade.

1.2. ESTRUTURA DA TESE

O presente trabalho encontra-se dividido em sete capítulos, sendo o primeiro um capítulo introdutório à dissertação.

O segundo capítulo trata da caracterização de maciços rochosos segundo as suas descontinuidades.

No terceiro capítulo são descritos os principais tipos de instabilidades em taludes e é desenvolvido o fenómeno do desprendimento de blocos.

No quarto capítulo são apresentadas as principais medidas de estabilização de taludes, com ênfase nas medidas de proteção contra a queda de blocos.

No quinto capítulo é introduzido o *software Rocfall* e explicado o seu modo de funcionamento, métodos de análise e parâmetros utilizados no cálculo das trajetórias dos blocos.

No sexto capítulo são expostos os resultados das simulações feitas no programa e dimensionamento de soluções de barreiras flexíveis para cada estudo paramétrico realizado.

O sétimo e último capítulo consiste numa pequena conclusão, onde são feitas algumas observações finais acerca do trabalho desenvolvido.

2

CARACTERIZAÇÃO DE MACIÇOS ROCHOSOS

2.1. INTRODUÇÃO

A mecânica das rochas é o estudo do comportamento mecânico das rochas e maciços rochosos e a sua resposta às forças a que estão submetidos. Para qualquer obra a construir no terreno, seja ela à superfície ou subterrânea, é essencial conhecer as estruturas existentes no local da construção, independentemente de serem maciços terrosos ou rochosos. Neste capítulo vão ser abordados apenas os últimos.

Primeiramente, há que conhecer os tipos de rocha; as rochas são classificadas em três tipos, segundo a sua origem: as rochas ígneas ou magmáticas, as sedimentares e as metamórficas. As rochas ígneas resultam da solidificação e consolidação do magma (lava). Exemplos deste tipo de rocha são o granito e o basalto. As rochas sedimentares formam-se a partir de fragmentos de outras rochas que se vão deteriorando ao longo do tempo, devido ao vento, chuva, gelo, etc. Estes sedimentos são depois acumulados e depositados com o tempo, formando assim uma nova rocha. Alguns exemplos de rochas sedimentares são o calcário e os arenitos. Existem também rochas sedimentares bioquímicas, constituídas por detritos orgânicos ou por materiais resultantes de ações bioquímicas, ou pela deposição e transformação de matéria orgânica. Por último, as rochas metamórficas resultam da transformação de outras rochas, que sofrem transformações físicas e químicas por estarem submetidas a temperaturas e pressões elevadas. O mármore e o xisto são exemplos de rochas metamórficas.

Normalmente os maciços rochosos não são formados completamente por rocha sã; possuem fraturas ou fissuras na rocha devido às tensões a que estão sujeitos. Estas fraturas têm a designação de descontinuidades, que repartem o maciço em blocos de rocha intacta; por este motivo um maciço rochoso é um meio descontínuo. Um maciço rochoso é, portanto, o conjunto dos blocos de rocha intacta, ou matriz rochosa, e as suas descontinuidades. Assim, o estudo das descontinuidades é essencial para compreender o comportamento de um maciço, nomeadamente a sua resistência, deformabilidade e permeabilidade: a determinação da qualidade de um maciço rochoso passa sempre por conhecer as suas descontinuidades.

2.2. TIPOS DE DESCONTINUIDADES

As características das descontinuidades mais significativas para a segurança e estabilidade de maciços rochosos são as suas orientações e dimensões. Através destas é possível definir os blocos potencialmente instáveis, em termos da sua grandeza e forma. A resistência ao deslizamento das descontinuidades tem também relevância conhecer, pois é o que condiciona a resistência ao escorregamento dos blocos. Descontinuidades paralelas entre si conferem uma alta anisotropia aos maciços. Por outro lado, quanto mais interligadas forem as descontinuidades menor será a anisotropia (Priest, 2012).

As discontinuidades podem ser de vários tipos, de entre os quais se destacam os mais comuns:

Falha: Fratura do maciço com deslocamento ao longo de uma superfície de rotura bem definida, logo de fácil identificação; geralmente aparecem em conjuntos de discontinuidades (famílias de discontinuidades). São maioritariamente resultado da atividade tectónica. A falha divide o maciço em dois blocos que se deslocam em sentidos opostos numa direção paralela ao plano da superfície de rotura (Figura 1). As falhas podem variar bastante no seu comprimento; podem ir desde alguns centímetros de comprimento, para pequenos deslocamentos dos blocos, até centenas de quilómetros para deslocamentos mais elevados.



Figura 1 - Exemplo de uma discontinuidade do tipo falha num maciço rochoso (Brasil Escola, 2018)

Superfície de estratificação: São formadas a partir dos estratos ou camadas das rochas e da deposição de sedimentos; estas superfícies não são obrigatoriamente horizontais. São facilmente identificáveis devido à estratigrafia das rochas (Goodman, 1989).

Foliação: Neste tipo de discontinuidade a rotura dá-se ao longo de superfícies aproximadamente paralelas. Tal deve-se ao facto de os minerais lamelares em rochas metamórficas terem orientação paralela. Esta disposição provém do processo de recrystalização durante o metamorfismo, um fenómeno comum em rochas cristalinas. As foliações são visíveis a olho nu, mas por vezes apenas ao microscópio. A fissilidade, a propriedade de algumas rochas metamórficas de se dividirem em lâminas de espessura muito reduzida, diminui com o aumento do grau de metamorfismo (Barton, 1978).

Clivagem: É um tipo de foliação que ocorre em camadas rochosas de baixa resistência entre camadas de maior resistência, e que origina fraturas paralelas. Desenvolve-se como resultado da deformação e metamorfismo da rocha.

Xistosidade: Em rochas com um grau de metamorfismo médio, tal como os xistos, dá-se um tipo de foliação, designada por xistosidade. Neste tipo de discontinuidades desenvolvem-se mais cristais, tais como micas, feldspatos e quartzos.

Diáclase: São as discontinuidades mais frequentes. Distinguem-se das falhas por não haver deslocamento ao longo da superfície de rotura ou haver um deslocamento que não seja significativo. Por vezes, dentro de uma família de diáclases (conjunto de diáclases aproximadamente paralelas entre si), algumas das discontinuidades que sofreram um deslocamento reduzido podem ser preenchidas por minerais que se formam nessas zonas ou por fragmentos de rocha, o que torna difícil a sua identificação

(Barton, 1978). Geralmente interseitam superfícies primárias como as superfícies de estratificação, clivagem e xistosidade (Figura 2).

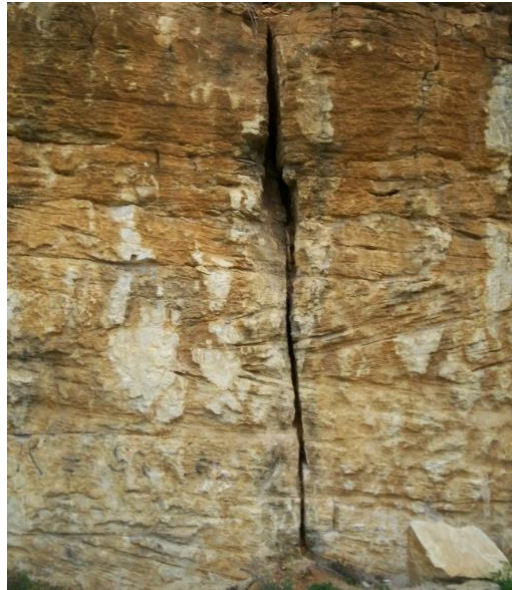


Figura 2 - Exemplo de uma descontinuidade do tipo diáclase num maciço rochoso (Wikimedia Commons, 2018)

2.3. CARACTERIZAÇÃO DAS DESCONTINUIDADES

A determinação das propriedades mecânicas e geométricas das descontinuidades de um maciço rochoso é essencial para prever o seu comportamento mecânico e para determinar as dimensões dos seus blocos constituintes.

As características das descontinuidades que mais condicionam o comportamento geotécnico do maciço rochoso são o número de famílias, orientação, desenvolvimento, espaçamento, rugosidade, enchimento e abertura.

Famílias de descontinuidades

Um conjunto de descontinuidades com a mesma orientação e origem forma uma família, e por sua vez um grupo de famílias específico de uma dada zona do maciço define um sistema de descontinuidades (Lima, Menezes e Topa Gomes, 2012). O número de famílias de descontinuidades num maciço rochoso influencia o comportamento mecânico e os mecanismos de rotura desse maciço. Uma família de descontinuidades é caracterizada pela sua orientação e propriedades características dos planos das descontinuidades. O número de famílias possibilita a determinação da extensão do maciço que pode ser formado sem provocar a rotura da rocha.

Orientação

Para conseguir caracterizar as descontinuidades de um maciço rochoso e identificar os blocos potencialmente instáveis é essencial saber a sua orientação. A orientação ou atitude de uma descontinuidade pode ser obtida através de elementos colhidos em mapeamentos de superfície ou

subterrâneos, amostras e furos de sondagens ou bússolas de clinómetro (Lima, Menezes e Topa Gomes, 2012).

Conhecendo a orientação das descontinuidades e o número de famílias de descontinuidades num maciço rochoso é possível determinar a forma dos blocos de rocha intacta. As formas dos blocos não são normalmente formas geométricas regulares, devido à irregularidade das orientações das descontinuidades de uma família. Blocos com formas regulares encontram-se geralmente em maciços de rocha sedimentar.

Para determinar as dimensões dos blocos de rocha intacta, é necessário conhecer, para além do número de famílias e da orientação, o desenvolvimento e espaçamento das descontinuidades.

Desenvolvimento

O desenvolvimento ou persistência de uma descontinuidade corresponde à sua extensão em área. É definida através da medição do comprimento da descontinuidade nas faces expostas do maciço. É um parâmetro importante pois condiciona a resistência ao corte, que contribui para a estabilidade do maciço. Contudo, não é de fácil determinação, devido à dificuldade de acesso a toda a extensão da descontinuidade.

A representação do desenvolvimento pode ser feita através de blocos-diagrama obtidos por visualizações de campo (Figura 3).

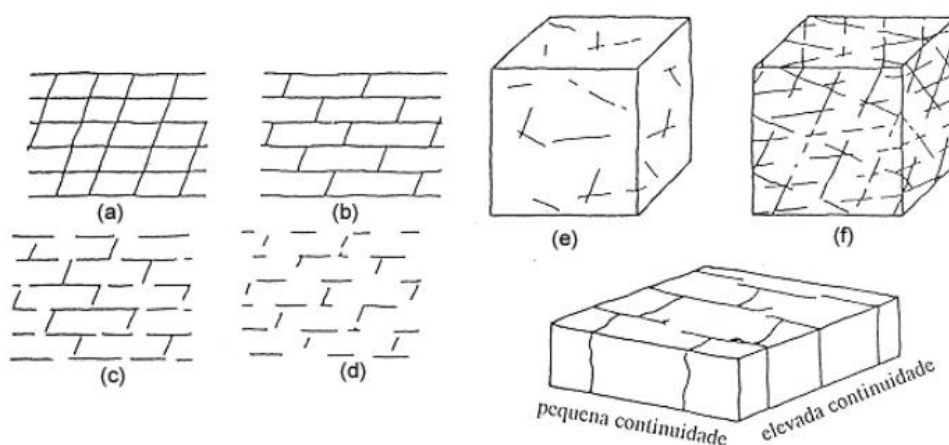


Figura 3 - Representações simples e blocos-diagrama para exemplificar a continuidade relativa de várias famílias de descontinuidades

O desenvolvimento pode ser calculado medindo o comprimento do traço da superfície das descontinuidades em superfícies expostas do maciço e, a partir dessas medições, estimar as áreas médias das diversas famílias de descontinuidades.

Espaçamento

O espaçamento é definido pela distância entre duas descontinuidades contíguas pertencentes à mesma família. Este parâmetro é relevante para o comportamento do maciço, nomeadamente em relação à

deformabilidade, resistência ao corte e permeabilidade; é um dos principais parâmetros para determinar o volume dos blocos de rocha intacta situados entre as descontinuidades. Pode ser medido ao longo de uma linha de observação na face de um talude, numa parede de um túnel ou numa sondagem; neste último caso, se a recuperação for razoável, é possível caracterizar as descontinuidades e distingui-las entre naturais e provocadas por ações mecânicas. Para examinar o espaçamento e a orientação das descontinuidades nas paredes de um furo de sondagem são utilizadas pequenas câmaras de filmar. Os comprimentos de amostragem devem ser superiores a aproximadamente dez vezes o espaçamento das descontinuidades previamente definida.

O espaçamento médio é determinado registando o número das descontinuidades, N'' , que interseccionam a linha de observação com um comprimento conhecido, L , após um ajustamento se as descontinuidades não forem normais à linha de observação. Para um caso em que a linha de observação é horizontal e o ângulo das descontinuidades é ψ , o espaçamento médio é dado pela seguinte expressão.

$$\bar{s} = \frac{L \cdot \sin \psi}{N''} \quad (1)$$

Se o espaçamento for bastante reduzido, pode provocar uma perda parcial da coesão do maciço, levando a que haja variação dos mecanismos de rotura. Observa-se também que o espaçamento das descontinuidades diminui com a aproximação à superfície, devido à descompressão causada pela meteorização e erosão da rocha. Neste caso o mecanismo de rotura do maciço rochoso, que é normalmente do tipo translacional, poderá ser do tipo rotacional ou de rolamento de pequenos blocos de rocha.

Índices característicos

A Sociedade Internacional da Mecânica das Rochas (ISRM) propõe o estabelecimento de índices quantitativos e designações para caracterização dos maciços rochosos. O Quadro 1 mostra algumas dessas designações em função de características das suas descontinuidades. Na Figura 4 são representadas diferentes formas de blocos formados em maciços rochosos.

Quadro 1 - Designação de maciços rochosos em função das características das suas descontinuidades (ISRM, 1978)

Características	Tipo de maciço
Poucas descontinuidades ou muito espaçadas	Maciço compacto
Dimensões da mesma ordem de grandeza	Maciço de blocos paralelepípedicos
Uma dimensão consideravelmente menor que as duas restantes	Maciço tabular
Uma dimensão consideravelmente maior que as duas restantes	Maciço colunar
Grandes variações do tamanho e forma dos blocos	Maciço irregular
Fracturação intensa	Maciço esmagado

Índice dimensional de bloco - O índice dimensional de bloco, I_b , é um dos índices quantitativos propostos pela ISRM que pode ser usado teoricamente para determinar as dimensões médias dos blocos de rocha mais frequentes. Em maciços com três famílias de descontinuidades quase ortogonais, que formam blocos paralelepípedicos ou cúbicos, como é o caso dos maciços sedimentares, o valor do índice dimensional do bloco pode ser representado pela média dos valores modais dos espaçamentos das descontinuidades. Nestas condições o volume dos blocos é dado pela expressão seguinte:

$$V = \frac{s_a \cdot s_b \cdot s_c}{\sqrt{1 - (\cos \alpha)^2 - (\cos \beta)^2 - (\cos \gamma)^2 - 2 \cos \alpha \cos \beta \cos \gamma}} \quad (2)$$

s_a, s_b, s_c – espaçamento das 3 famílias de descontinuidades A, B e C;

α, β, γ – ângulos diedros definidos entre as superfícies de descontinuidade das famílias B-C, A-C, e A-B.

Em maciços com menos de três famílias de descontinuidades, este índice não se aplica visto que não se formam blocos. No caso de maciços com mais de três famílias, o valor deste índice determinado através deste método pode fornecer resultados irrealistas; isto porque pode existir uma família de descontinuidades muito afastada das outras e o valor do índice obtido será superior, apesar dessa família de descontinuidades ter apenas uma pequena influência na dimensão dos blocos.

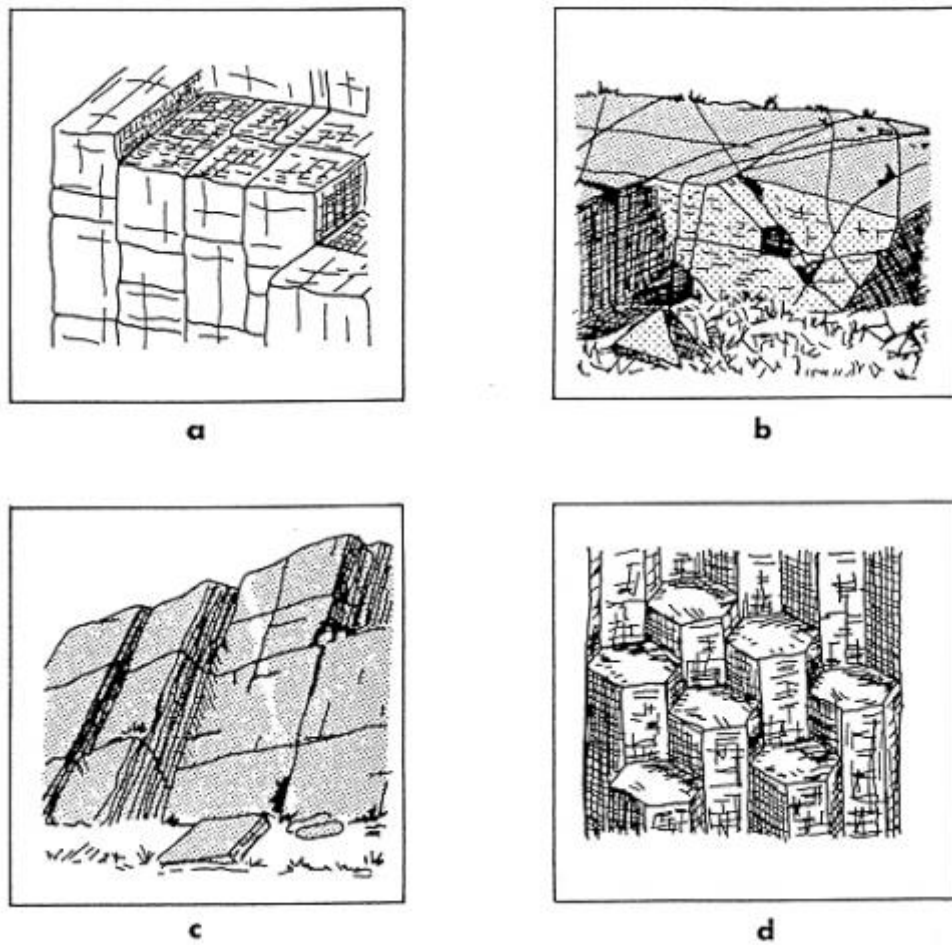


Figura 4 - Representação esquemática de maciços rochosos: a) blocos paralelepípedicos; b - blocos irregulares; c - blocos tabulares; d - blocos colunares (ISRM, 1978)

Índice volumétrico - O índice volumétrico, J_v , é outro índice proposto pela ISRM, mais correntemente utilizado, podendo ser determinado através do somatório do número de descontinuidades de cada família por metro de amostragem, medido na direção normal a cada uma das famílias do maciço. O comprimento de medida é normalmente de 5 ou de 10 metros. No Quadro 2 apresentam-se as designações das dimensões dos blocos, em função do valor do índice volumétrico.

Quadro 2 - Designação das dimensões dos blocos em função do índice volumétrico, J_v (ISRM, 1978)

Descrição	J_v (descontinuidades/m ³)
Muito grandes	< 1
Grandes	1 - 3
Médios	3 - 10
Pequenos	10 - 30
Muito pequenos	> 30

Se o índice volumétrico for superior a 60, considera-se que o maciço rochoso está muito fragmentado.

Para além da disposição geométrica, é importante qualificar as propriedades físicas das descontinuidades: abertura, enchimento e rugosidade, que influenciam o comportamento mecânico do maciço, nomeadamente a resistência ao deslizamento.

Abertura

A abertura corresponde à distância entre as paredes de uma descontinuidade, medida perpendicularmente à superfície da descontinuidade. A abertura das descontinuidades é um parâmetro importante para o comportamento do maciço. Se as descontinuidades que se formam no maciço se encontrarem fechadas, as propriedades do maciço podem-se assumir idênticas às propriedades da rocha que o compõe; se estiverem abertas, a sua influência depende de se encontrarem preenchidas ou não.

Enchimento

Enchimento refere-se ao material que preenche o espaço entre as paredes da descontinuidade. Caso a descontinuidade esteja preenchida, a distância medida perpendicularmente às suas paredes é chamada de espessura. O material do enchimento tem grande influência nos parâmetros geotécnicos de uma descontinuidade, particularmente na resistência ao corte, deformabilidade e permeabilidade. Por exemplo, se uma descontinuidade estiver preenchida por um material com uma fraca resistência e alta deformabilidade, a resistência do maciço vai ser menor; por outro lado, se a descontinuidade estiver preenchida por um material com uma resistência alta e deformabilidade baixa, a resistência do maciço irá aumentar. Repare-se igualmente que, se a descontinuidade for preenchida por um material bastante permeável, a permeabilidade do maciço vai aumentar também (Singhal e Gupta, 2010). Nas falhas, o material do enchimento corresponde geralmente ao material rochoso dessas descontinuidades, podendo ter um grau de alteração maior ou menor. A Figura 5 representa três situações distintas do preenchimento de descontinuidades: descontinuidade fechada, aberta e preenchida.

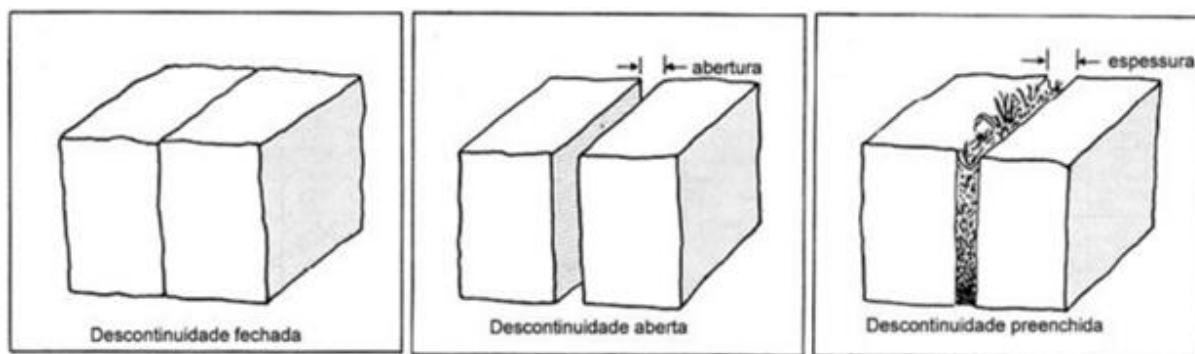


Figura 5 - Exemplos de preenchimento de descontinuidades: descontinuidade fechada, aberta e preenchida

Rugosidade

A rugosidade das descontinuidades é das propriedades mais importantes para a estabilidade e resistência de um maciço. Está profundamente ligada à resistência ao deslizamento das descontinuidades, que condiciona a resistência ao escorregamento dos blocos. Esta propriedade das descontinuidades tem um efeito favorável à resistência com a diminuição da abertura e da espessura do enchimento. É de fácil compreensão que descontinuidades mais rugosas oferecem um incremento de resistência ao corte, visto que o deslocamento tangencial dos blocos se torna mais difícil. Se as descontinuidades forem lisas, o atrito entre as paredes da descontinuidade é mínimo, logo o deslizamento é mais fácil e a resistência ao deslizamento é mais baixa.

A rugosidade pode ser caracterizada pela curvatura (ondulações das paredes da descontinuidade) e pelas asperidades (irregularidades da superfície). Note-se que as ondulações ocorrem a grande escala e as asperidades a pequena escala. As asperidades condicionam a resistência ao deslizamento da descontinuidade, e normalmente são atenuadas quando ocorre deslizamento. Caso as paredes estejam em contacto, vão provocar dilatação positiva pelo facto de estarem compactadas ou encaixadas.

A caracterização da rugosidade pode ser feita em duas escalas de observação: escala pequena e escala intermédia. A escala intermédia é dividida em três graus - patamar, ondulada e planar – e sobreposta à rugosidade de pequena escala, que é também dividida em três graus - rugosa, lisa e espelhada, definindo-se assim nove perfis típicos de rugosidade, representados na Figura 6, tendo cada um associado um valor do coeficiente de rugosidade (JRC).

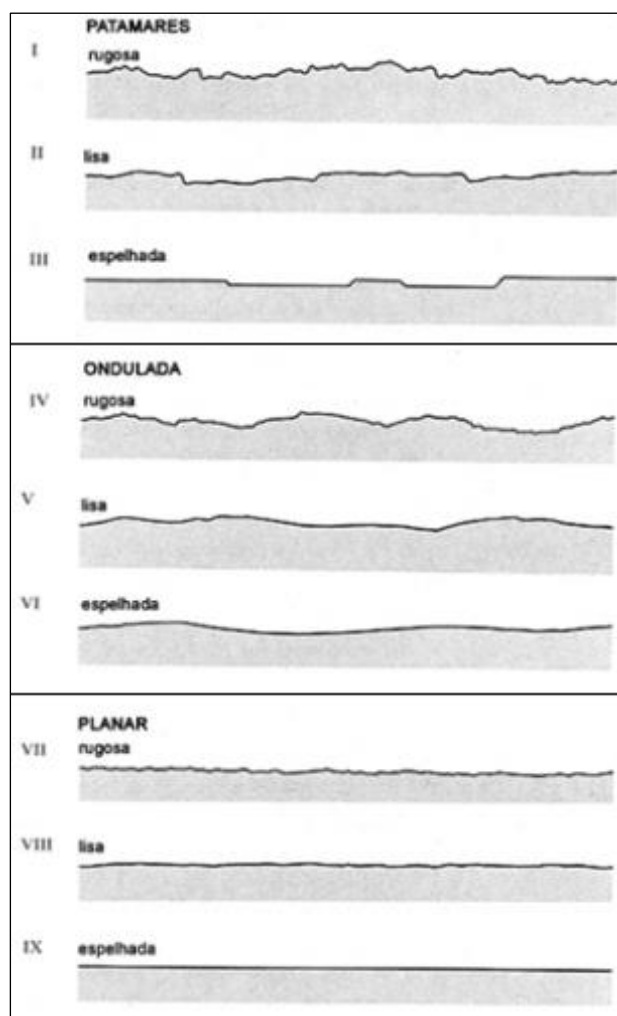


Figura 6 - Perfis típicos de rugosidade

Resistência das paredes

A resistência das paredes de uma descontinuidade depende do tipo de rocha, grau de alteração e do enchimento; os processos de alteração e meteorização das rochas afetam maioritariamente as paredes da descontinuidade, logo também a resistência ao corte do maciço e a deformabilidade. A resistência das paredes pode ser estimada através do martelo de Schmidt, um ensaio cujos resultados podem ser relacionados com a resistência à compressão simples (Hudson e Harrison, 2000).

Representação das descontinuidades

A orientação ou atitude de uma descontinuidade é definida pelo pendor ou mergulho da linha de maior declive (*dip*) do respetivo plano que a contém, através do ângulo medido no sentido descendente a partir da horizontal, e pelo azimute da direção dessa mesma linha (*dip direction*), medido a partir do Norte no sentido dos ponteiros do relógio. Pode também ser representada pelo mergulho da linha de maior declive (*dip*) e pelo azimute da reta de nível do plano da descontinuidade (*strike*). Um exemplo de representação da orientação de descontinuidades é apresentado na Figura 7.

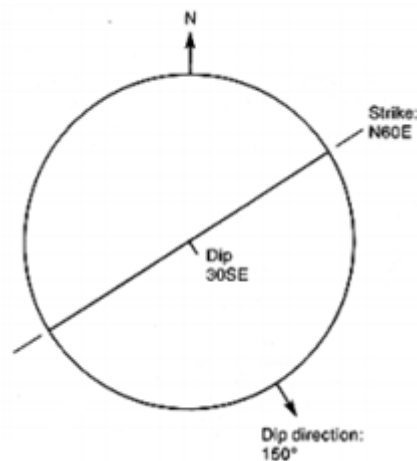


Figura 7 - Exemplo de representação da orientação de descontinuidades

A representação das orientações não é feita da mesma maneira para todos os tipos de descontinuidades. Por exemplo, no caso das falhas cada uma corresponde a um caso próprio, logo são representadas isoladamente. No caso de existir um elevado número de descontinuidades, a representação é feita através de uma análise estatística das suas características para conseguir representar a compartimentação do maciço. Esta análise consiste em representar algumas das orientações das descontinuidades numa planta geológica, fazer o tratamento dos dados e definir a envolvente das características físicas de cada família de descontinuidades. A recolha dos dados para o estudo pode ser feita através da observação de afloramentos ou da observação direta ou indireta do interior do maciço, com recurso a operações de prospeção.

A representação das orientações pode ser feita através do método da roseta, um método de representação bastante simples mas relativamente escasso em termos da informação que fornece. Uma outra representação, largamente utilizada no ramo da engenharia civil e na geologia estrutural, é a projeção estereográfica.

A projeção estereográfica é uma representação gráfica que estuda as relações bidimensionais entre planos e retas num diagrama tridimensional e é bastante usada na análise de estabilidade de taludes. Considere-se uma esfera imaginária e um determinado plano a passar pelo seu centro, como mostra a Figura 8. A intersecção do plano com a superfície da esfera é o círculo maior. A reta que passa pelo centro da esfera perpendicularmente ao plano intersecta a esfera em dois pontos diametralmente opostos chamados de polos do plano. O plano da descontinuidade é então representado pelo círculo maior e pelos polos, em duas dimensões, sendo necessário apenas um dos hemisférios para o representar (normalmente o inferior), como pode ser observado na Figura 8.

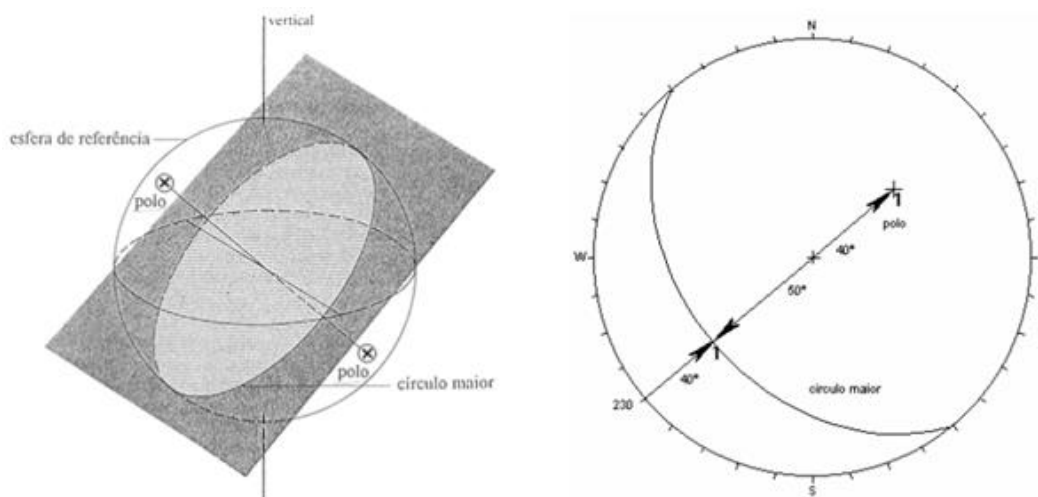


Figura 8 - Círculo maior e polos definidores da orientação de um plano, e representação do plano N40W,40SW

Feita a representação das discontinuidades, segue-se a identificação das famílias de discontinuidades e da orientação representativa de cada uma, após a qual se averigua a dispersão das restantes orientações em relação à orientação representativa.

Inicialmente a projeção estereográfica era feita manualmente no papel, mas hoje em dia existem programas informáticos, tal como o *software DIPS*, da *Rocscience*, que facilitam a representação, fazendo-o de uma maneira mais simples e prática. Este programa permite fazer o tratamento de dados recolhidos de um conjunto de discontinuidades, representar as suas famílias e orientações, e analisar a sua projeção estereográfica (Figura 9). É um programa bastante utilizado no âmbito da engenharia civil para a análise da estabilidade de taludes rochosos.

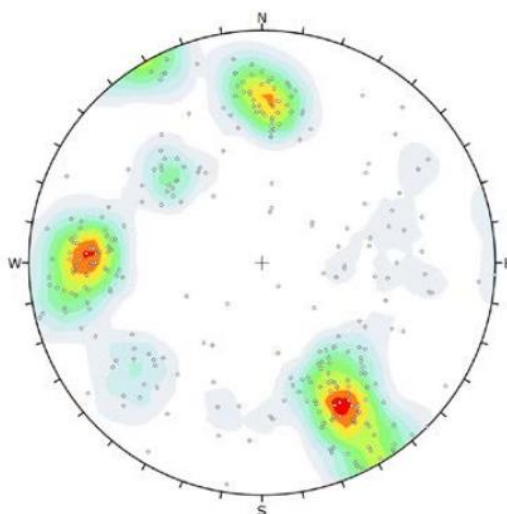


Figura 9 - Representação de diferentes famílias de discontinuidades no programa *DIPS*

É possível perceber, assim, a utilidade da representação das descontinuidades, que é uma ferramenta valiosa para a análise da estabilidade de taludes; este assunto será abordado com mais detalhe no próximo capítulo.

2.4. CLASSIFICAÇÃO DE MACIÇOS ROCHOSOS

As classificações de maciços rochosos surgiram da necessidade de os caracterizar, para auxiliar a resolução de problemas de engenharia. O facto de não existir uma classificação universal levou a que a Sociedade Internacional de Mecânica das Rochas (ISRM), em 1972, e a Associação Internacional de Geologia de Engenharia (IAGE), em 1975, fizessem progressos neste campo criando sistemas de classificação com o objetivo de serem aceites internacionalmente. Apesar de ainda hoje não haver uma classificação universal, os sistemas mais usados são o *Rock Mass Rating* - RMR, desenvolvido por Bieniawski, em 1989, e o sistema Q, desenvolvido por Barton, em 1974, este mais usado em obras subterrâneas. Estas classificações foram desenvolvidas empiricamente, e têm como princípio a observação direta do maciço rochoso e a realização de ensaios, *in situ* ou em laboratório, fornecendo um índice de qualidade do maciço.

No sistema RMR, Bieniawski considerou seis parâmetros do comportamento dos maciços rochosos: resistência à compressão uniaxial da rocha intacta, RQD (*Rock Quality Designation*), espaçamento das descontinuidades, condição das descontinuidades, influência da água, orientação das descontinuidades - e atribuiu um peso a cada parâmetro. A soma dos pesos de cada parâmetro corresponde ao RMR, que é associado a uma das classes de qualidade dos maciços que o autor considerou.

Outro sistema de classificação dos maciços rochosos é o sistema GSI (*Geological Strength Index*), que foi desenvolvido por Hoek, em 1995, com o objetivo de estimar a redução da resistência do maciço sujeito a diferentes condições geológicas. O GSI é estimado em função da estrutura do maciço e das características das superfícies das suas descontinuidades. A estrutura do maciço depende do grau de fragmentação da rocha, da quantidade e tipo de descontinuidades, da forma dos blocos. Em relação às características das descontinuidades, estas são caracterizadas em função da sua rugosidade, grau de alteração e preenchimento.

3

PRINCIPAIS TIPOS DE INSTABILIDADE EM TALUDES

3.1. INTRODUÇÃO

A análise da estabilidade de um talude rochoso é de extrema importância pois o colapso destas formações geológicas pode provocar danos humanos e materiais. Vários contextos devem ser considerados, tais como a proximidade de um talude instável a habitações ou a estradas. Nestas situações, é necessário analisar a possibilidade de relocar a estrada ou a área habitacional em questão para uma zona mais segura, e caso não seja possível, proceder à estabilização do talude; se estes procedimentos não forem suficientes para garantir a segurança do talude, então devem ser tomadas medidas de proteção contra blocos de rocha que possam cair. Estes aspetos serão abordados posteriormente.

Os taludes rochosos formam-se como consequência da meteorização e erosão que as rochas sofrem ao longo do tempo. A meteorização é o processo de degradação da rocha e dos seus minerais devido às ações ambientais, tais como o calor, água, gelo, vento e ondas do mar. Este fenómeno pode ser físico ou químico: a meteorização química distingue-se da física pois nesta última não há alteração da composição química da rocha. Os processos físicos de degradação da rocha podem ser devidos a diversas situações, de entre as quais se destacam as variações de temperatura, que causam expansão ou contração da rocha, e os ciclos gelo-degelo, que ocorrem quando o gelo se forma nas discontinuidades da rocha e faz com que aumentem de volume; quando o gelo derrete, a água consegue percorrer mais facilmente o interior da rocha, contribuindo assim para a sua deterioração. Por sua vez, a meteorização química é caracterizada pelo facto de haver alteração da composição química dos minerais constituintes da rocha, e pode acontecer devido a vários fatores, como a presença de água, que provoca dissolução, e a presença de oxigénio, que causa oxidação dos minerais. Estes processos de alteração química fazem com que a rocha fique fragmentada e fissurada. Em geral, a meteorização aumenta a porosidade, permeabilidade e deformabilidade da rocha, diminuindo assim a sua resistência (González de Vallejo et al., 2002). Os solos são formados a partir do material que permanece depois dos processos de meteorização das rochas juntamente com material orgânico. Enquanto que a meteorização ocorre no próprio lugar, afetando as características da rocha, a erosão envolve a remoção do material de um local para outro. A erosão acontece por ação dos ventos, da água, entre outros, que separam a rocha (já danificada devido à meteorização) em partes que são depois removidas do seu sítio original. Devido às ações do vento, a parte superficial do maciço é deslocada, o que faz com que a rocha intacta fique exposta, ficando assim sujeita à meteorização. A água da chuva é também um fator que contribui para a erosão das rochas, pois desagrega a rocha em blocos e provoca o deslizamento dos mesmos. Estes efeitos tendem a diminuir as áreas mais salientes da rocha, tornando-a mais plana, como se verifica nos taludes ou encostas (Bell, 2003).

Como foi previamente referido, os maciços rochosos são compostos pelos blocos de rocha intacta e pelas suas descontinuidades, que têm um grande peso na análise da estabilidade. A rotura num talude rochoso acontece devido à presença das descontinuidades e pelo facto de o material que constitui o maciço se encontrar muito alterado ou fragmentado. Os movimentos de massa num talude podem ser desencadeados por causas naturais, como chuvas intensas e sismos, ou por intervenção humana, como obras de aterro ou escavações, que provocam um rearranjo – este pode ser um incremento ou um alívio – das tensões no maciço.

Para se proceder ao estudo da estabilidade, é necessário então identificar o tipo de instabilidade criada no talude. Assumindo que um talude instável entra em colapso, provocando o escorregamento de parte do maciço, a rotura pode ocorrer de maneiras diferentes, dependendo da superfície de rotura que origina. Existem quatro tipos de rotura possíveis: rotura circular, rotura plana, rotura por blocos prismáticos e *toppling*. Estes modelos correspondem a casos simples. Na realidade os maciços contêm mais do que um tipo de instabilidade. Os tipos de colapso dependem da estrutura geológica do maciço, ou seja, do grau de fracturação, distribuição e orientação das descontinuidades. Para determinar a direcção segundo a qual o bloco irá deslizar e ter uma ideia das condições de estabilidade é feita uma análise cinemática. Um utensílio vantajoso para o estudo da instabilidade em taludes é a projecção estereográfica, que permite também determinar a direcção em que os blocos instáveis do talude deslizam.

3.2. TIPOS DE INSTABILIDADE

3.2.1. ROTURA CIRCULAR

A rotura circular, como o nome indica, caracteriza-se pelo facto de a superfície de deslizamento ser circular, e é mais típica em solos, mas pode também ocorrer em maciços rochosos muito fragmentados com descontinuidades orientadas para fora da face do talude (ver Figura 10).

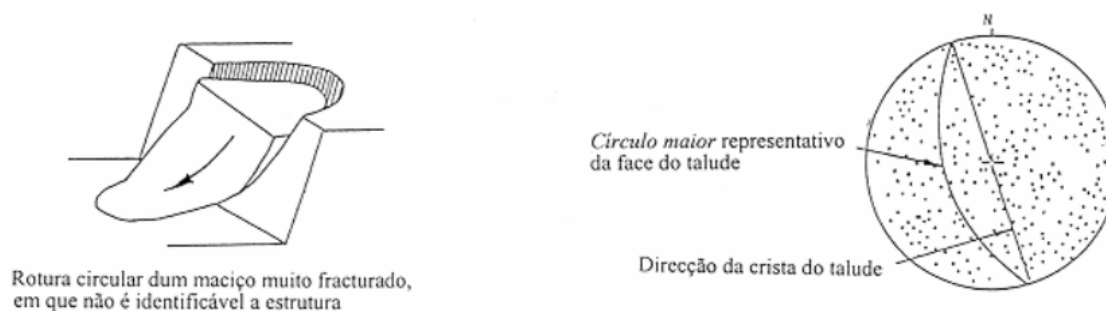


Figura 10 - Exemplo do tipo de instabilidade de rotura circular e respetiva representação estereográfica

Como os taludes rochosos têm uma grande resistência ao corte, este tipo de colapso só acontece se a maior parte da superfície de deslizamento coincidir com as descontinuidades; quando isto acontece, a superfície de escorregamento é geralmente pouco profunda e de raio elevado.

3.2.2. ROTURA PLANA

A rotura plana ocorre em maciços com estrutura muito orientada e com descontinuidades inclinadas na direção da face do talude. A rotura dá-se segundo um plano de uma descontinuidade já existente. Na representação estereográfica deste mecanismo, como as descontinuidades estão inclinadas para a face do talude, os polos das normais das descontinuidades encontram-se do lado contrário ao círculo maior correspondente à face do talude, como é possível observar na Figura 11.

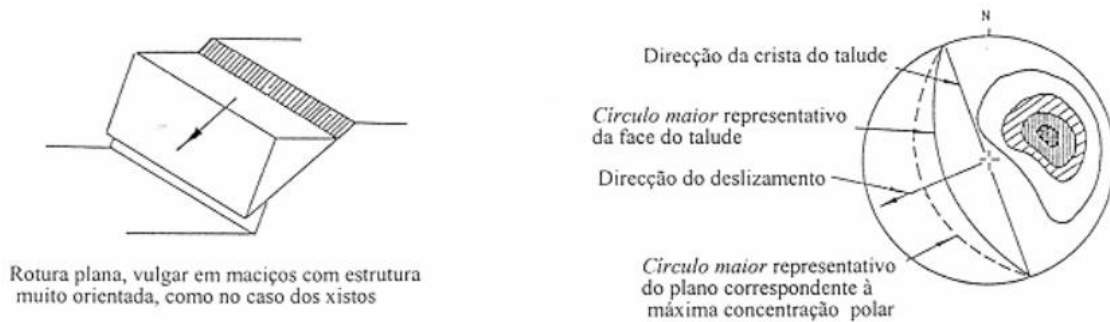


Figura 11 - Exemplo do tipo de instabilidade de rotura plana e respetiva representação estereográfica

Este tipo de rotura é raro em taludes rochosos porque normalmente as condições geométricas necessárias para dar origem a este tipo de rotura não acontecem num talude real. O plano que contém a descontinuidade tem de ser aproximadamente paralelo à face do talude. O pendor da linha de maior declive (*dip*) do plano que contém a descontinuidade tem de ser menor do que o pendor da face do talude; o pendor do plano da descontinuidade tem de ser maior do que o seu ângulo de atrito. No caso de taludes em formações estratificadas a rotura consiste no deslizamento de um ou mais estratos, o que acontece normalmente em maciços xistosos.

3.2.3. ROTURA POR CUNHAS

A rotura por cunhas ou por blocos tetraédricos é caracterizada pelo deslizamento de um bloco em forma de cunha, formado a partir da interseção de duas descontinuidades contidas em planos oblíquos à face do talude. Só acontece deslizamento se os planos das descontinuidades alcançam a face do talude; a linha da interseção define normalmente a direção do deslizamento. Este tipo de rotura acontece em maciços com duas ou mais famílias de descontinuidades. Neste caso, as descontinuidades são inclinadas na direção da face do talude, logo os polos das normais das descontinuidades encontram-se do lado contrário ao círculo maior correspondente à face do talude (ver Figura 12).

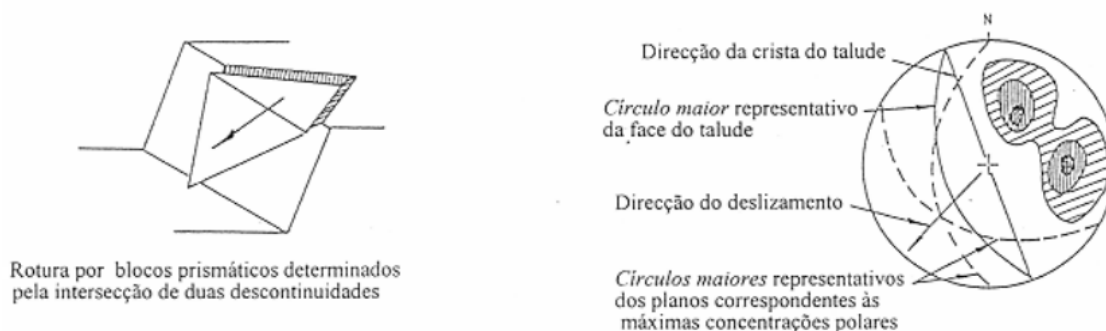


Figura 12 - Exemplo do tipo de instabilidade de rotura por cunhas e respetiva representação estereográfica

A rotura por cunhas pode acontecer sob mais condições geológicas do que a rotura plana, o que a torna numa componente importante do estudo da estabilidade de taludes rochosos. Para identificar as cunhas potencialmente instáveis é feita uma análise cinemática. As condições geométricas necessárias para dar origem a este tipo de rotura são: dois planos de descontinuidades interseitam-se formando uma linha; o pendor da linha de intersecção deve ser menor do que o pendor da face, e maior do que o ângulo de atrito dos dois planos de descontinuidades; o polo da linha de intersecção emerge na face do talude (Wyllie e Mah, 2004).

3.2.4. ROTURA POR TOPPLING

A rotura por *toppling* ocorre em maciços de boa qualidade, em que se formam “colunas” de rocha delimitadas por descontinuidades muito inclinadas e que rodam sobre a base do talude. Estas descontinuidades estão direccionadas para o interior do talude, logo na representação estereográfica deste tipo de rotura, os polos das normais das descontinuidades e o círculo maior da face do talude encontram-se do mesmo lado (Figura 13).

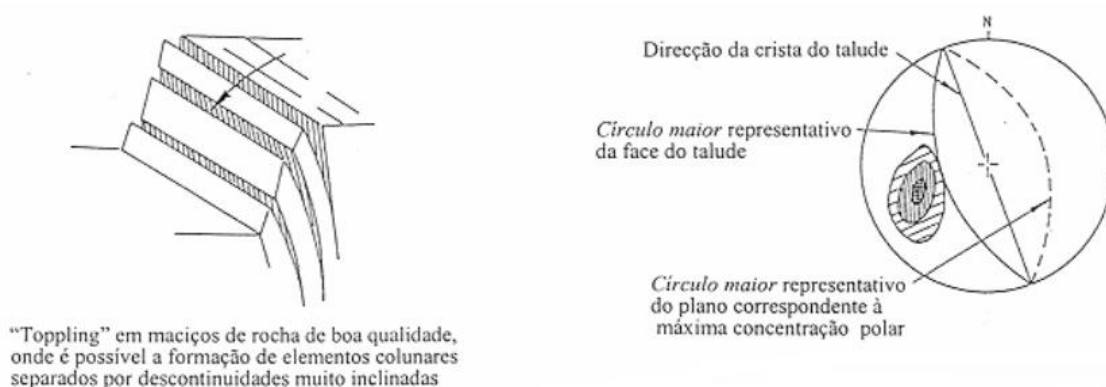


Figura 13 - Exemplo do tipo de instabilidade de rotura por *toppling* e respetiva representação estereográfica

Para que ocorra rotura por *toppling*, o azimuth da reta de maior declive das descontinuidades não deve divergir mais do que 20° do azimuth da reta de maior declive do plano da face. O pendor dos planos de descontinuidades deve ser suficientemente elevado para que o escorregamento entre blocos se possa

desenvolver. Este tipo de instabilidade só ocorre se o ângulo entre a direção das tensões de compressão aplicadas e a normal às descontinuidades for superior ao valor do ângulo de atrito das faces das camadas.

Existem outros importantes tipos de instabilidade em taludes rochosos: correntes de detritos e destacamento de blocos, sendo este último o tema que se irá desenvolver ao longo do presente trabalho. Os dois podem ocorrer no mesmo talude, assim como os tipos de instabilidade expressos anteriormente.

3.2.5. CORRENTES DE DETRITOS

As correntes de detritos são originadas por um forte fluxo de água numa formação geológica, normalmente geradas pela água da chuva. São correntes de sedimentos, lamas e blocos que se encontram separados da rocha devido à degradação e compartimentação do maciço, causando o seu deslizamento ao longo da superfície do talude; ocorrem principalmente nas regiões montanhosas e nas vertentes de maior declive. Podem ser bastante destrutivas devido às velocidades e volumes que conseguem alcançar, podendo causar danos não só materiais como humanos. A Figura 14 mostra a ocorrência de um fluxo de detritos numa encosta.

Os principais aspetos que contribuem para a formação de correntes de detritos muito fortes e rápidas são as elevadas inclinações de encostas, altas quantidades de detritos e blocos de rocha soltos, falta de vegetação, e o volume de água, pois sendo mais fluido, o fluxo será mais rápido e destrutivo. A presença de vegetação é vantajosa pois as raízes das plantas ajudam a tornar o maciço mais seguro, para além de absorverem mais água, retirando-a assim do interior do maciço; porém, este efeito é mais significativo em solos, que geralmente possuem mais vegetação do que os maciços rochosos. Este tipo de instabilidade distingue-se dos mencionados previamente pois as correntes de detritos são provocadas pela água e são formadas por fragmentos de rocha soltos, enquanto que nos casos anteriores há formação de uma superfície de rotura segundo a qual uma grande parte do maciço colapsa.



Figura 14 - Exemplo do tipo de instabilidade de correntes de detritos (The Landslide Blog, 2018)

Os fluxos de detritos são causados principalmente por chuvas fortes, mas há outras situações que os podem originar; por exemplo, quando a neve instalada no topo de uma encosta ou talude derrete rapidamente, a água escorre pelo maciço, lubrificando os blocos e detritos soltos e desencadeando o fluxo (Highland e Bobrowsky, 2008). Outro aspeto que pode causar o desenvolvimento de uma corrente de detritos é um incêndio florestal: quando há um incêndio, a vegetação na face do talude é destruída, eliminando assim o contributo das raízes para a estabilidade; logo, se chover nestas condições, a água consegue descer livremente a encosta, enquanto que antes do desaparecimento da vegetação era parcialmente absorvida pelas plantas. A deflorestação tem o mesmo efeito prejudicial.

Este tipo de instabilidade, sendo mais comum em áreas montanhosas, é particularmente perigoso para as povoações instaladas no pé de uma montanha ou de uma encosta, que estando situadas na base de uma vertente rochosa podem sentir com grande impacto as consequências deste fenómeno. É, portanto, de grande interesse estudar a estabilidade de taludes que se situam nas proximidades de estradas, populações e infraestruturas.

3.2.6. DESTACAMENTO DE BLOCOS

O destacamento de blocos em taludes rochosos consiste na formação de blocos potencialmente instáveis que, devido à compartimentação do maciço segundo os planos das suas descontinuidades, se separam da rocha e caem pela encosta abaixo (Figura 15). O volume dos blocos pode variar desde pequenas pedras a enormes blocos que podem atingir altas velocidades durante a queda. Este tipo de instabilidade ocorre maioritariamente em maciços rochosos e em taludes muito inclinados e escarpados, e contrariamente aos casos anteriores, não se verifica escorregamento de massa rochosa; também se verifica que, tal como na instabilidade das correntes de detritos, não há formação de uma superfície de rotura. A queda dos blocos pode ser desencadeada por fatores ambientais, como os efeitos da erosão, a entrada de água para as descontinuidades ou até a presença de animais, mas também como consequência de obras nas imediações do talude, tal como escavações e detonações; pode também ser provocada por sismos.



Figura 15 - Exemplo das consequências do desprendimento de blocos

Muitas vezes as estradas são construídas na base de um talude rochoso com possibilidade de destacamento de blocos, tornando-as em zonas extremamente perigosas. A queda de um bloco de grandes dimensões numa autoestrada com intenso tráfego é suscetível de provocar inúmeros danos, tanto materiais como humanos, ou até mesmo a queda de pequenos blocos pode causar um acidente rodoviário. É, portanto, de grande importância estudar este fenómeno e os contributos para a segurança em relação a este tipo de instabilidade. Uma componente importante do estudo do destacamento de blocos é realizar uma análise depois de o mesmo ocorrer, procurando determinar a zona onde se originaram os desprendimentos e a zona onde os blocos se imobilizaram. Conhecendo o ponto de partida e final dos blocos, examina-se essa zona para identificar os pontos de impacto no talude para reproduzir a sua trajetória. Estes pontos podem ser observados no terreno, em árvores ou outros obstáculos em que os blocos possam ter embatido no seu percurso. Através de uma observação do tamanho dos blocos no ponto final da queda e na zona de desprendimento, é possível averiguar se os blocos se partiram ao longo do seu percurso, o que normalmente acontece; porém, não é possível saber se as pedras foram partidas no momento do desprendimento, ou ao longo da sua queda pela encosta, ou na zona final onde se imobilizaram, o que contribui para a aleatoriedade e difícil previsão deste fenómeno (Luis Fonseca, 2010).

Para compreender este mecanismo de instabilidade e tomar medidas de proteção, é necessário prever a trajetória dos blocos, que será influenciada pelo declive do talude, existência de obstáculos, características físicas e mecânicas da rocha, entre outros. A topografia e declive da face do talude condicionam a maneira como o bloco cai: se a superfície possuir bastantes irregularidades o bloco pode saltar e atingir zonas mais afastadas da face do talude; se o declive for elevado então o bloco irá alcançar grandes velocidades, tornando-se mais destrutivo; o mesmo se aplica para a altura do talude. As características do material também influenciam o movimento dos blocos, dependendo da sua resistência e grau de fracturação. Por exemplo, se a rocha for bastante dura e resistente, o bloco adquire velocidade e maior alcance quando colide com um obstáculo; pelo contrário, se a rocha for fraca e bastante fragmentada, é provável que o bloco quebre com o impacto ao embater num obstáculo ou no terreno, atenuando assim o seu efeito desfavorável.

O estudo da trajetória dos blocos tem por base os tipos de movimento que um bloco pode ter durante a queda:

Queda livre - em taludes aproximadamente verticais, o movimento dos blocos é maioritariamente de queda livre. Devido à verticalidade da face do talude, um bloco que se desprenda irá cair ao longo da encosta sem obstáculos no seu caminho.

Salto - para inclinações elevadas (superiores a 45°, aproximadamente) os blocos adquirem velocidades elevadas e têm tendência a saltar para fora da face do talude, devido à rugosidade e irregularidades do terreno.

Rolamento - para inclinações entre os 30° e 45°, aproximadamente, o bloco não terá velocidades tão elevadas como nos casos anteriores, por isso a tendência não é que salte para fora da face, mas sim que se mantenha junto à mesma e rode sobre si mesmo; este movimento denomina-se de rolamento.

Deslizamento - em taludes com inclinações na ordem dos 30° ou menores, o bloco pode ter movimento de rolamento ou de deslizamento. O deslizamento distingue-se do rolamento porque neste tipo de movimento o bloco não roda sobre si mesmo. O movimento dependerá então da forma do bloco, pois se este for esférico, terá tendência a rolar, mas se for cúbico ou paralelepípedo, pode simplesmente deslizar sem rolar, sempre com a mesma face em contacto com o talude.

Na Figura 16 estão representados os diferentes tipos de movimento que os blocos podem ter durante a queda.

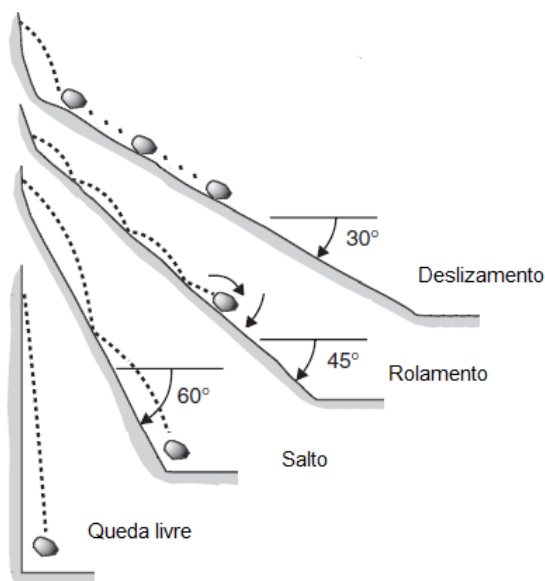


Figura 16 - Diferentes tipos de movimento dos blocos em função da inclinação do talude (adaptado de Ritchie, 1963)

Evidentemente que o movimento dos blocos não depende apenas da inclinação do talude, mas também das características do material rochoso (ângulo de atrito, rugosidade, etc), da forma e tamanho dos blocos, pelo que estes valores são apenas valores de referência. A presença de vegetação, o atrito entre o bloco e o terreno, a quantidade de detritos e obstáculos que possam existir no talude, são outros fatores que também influenciam a trajetória dos blocos. Porém, a previsão exata da trajetória é impossível, devido à quantidade de parâmetros de que depende e à variabilidade a eles associada.

4

ESTABILIZAÇÃO DE TALUDES

4.1. INTRODUÇÃO

No caso de um talude se encontrar nas imediações de zonas habitacionais ou estruturas urbanas, como referido anteriormente, é essencial verificar a sua estabilidade e se são cumpridas as condições de segurança necessárias para que não ocorra nenhum dos tipos de instabilidade já indicados. Se a estabilidade não for assegurada, passa-se então à estabilização do talude, através de métodos que serão descritos posteriormente; se essas medidas não forem suficientes para evitar todos os mecanismos de instabilidade, são feitas obras de proteção. Por exemplo, depois de feita a estabilização um talude com tendência a sofrer rotura global, pode continuar a ocorrer destacamento de blocos, logo deverão ser instaladas proteções.

4.2. ANÁLISE DA ESTABILIDADE DE TALUDES

A estabilidade de um talude pode ser representada pelo fator de segurança, que é o quociente entre as forças ou tensões resistentes e as desestabilizadoras: as forças resistentes são as que contrariam o deslizamento e as desestabilizadoras são as que o impõem. O coeficiente de segurança nunca pode ser menor do que um, pois isso significaria que as ações desestabilizadoras seriam maiores do que as estabilizadoras; deve ser maior do que um para garantir a estabilidade com alguma margem de segurança. O fator será maior ou menor consoante a segurança exigida; no caso de taludes provisórios (escavados no decorrer de uma obra, por exemplo) terá um valor inferior porque, como não são taludes definitivos, não requerem que a estabilidade seja assegurada durante longos períodos de tempo. Através desta análise é possível também determinar as medidas de estabilização necessárias para que não haja movimentos.

A estabilidade pode então ser avaliada através de modelos matemáticos determinísticos ou probabilísticos (González de Vallejo et al., 2002). Os métodos probabilísticos avaliam a probabilidade de rotura do talude, conhecendo as funções de distribuição de cada parâmetro considerado como variável aleatória e calculam o fator de segurança iterativamente. Estes métodos possuem um elevado grau de dificuldade pois requerem uma grande quantidade de dados para definir as distribuições de probabilidade do fator de segurança.

Os métodos determinísticos consistem em estimar o coeficiente de segurança a partir das propriedades físicas e resistentes do maciço. Dentro deste grupo destacam-se os métodos de equilíbrio limite, que consideram uma superfície de rotura para determinar o fator de segurança, com recurso aos critérios de cedência de Mohr-Coulomb ou de Barton. Este método tem como base as seguintes noções: a superfície de rotura considerada deve ter uma geometria que permita o deslizamento dos blocos instáveis; a

distribuição das forças envolvidas na rotura pode ser definida a partir de algumas características conhecidas, tal como o peso volúmico da rocha e a pressão da água; a resistência mobiliza-se ao longo de toda a superfície de rotura. São analisadas várias superfícies de rotura até encontrar a que tem o menor fator de segurança correspondente.

Para cada mecanismo de instabilidade (planar, por cunhas, *toppling*) o coeficiente de segurança é calculado de maneira diferente, mas sempre em função das forças atuantes no talude (supondo que não existem forças externas): forças coesivas - contribuem para a resistência ao deslizamento devido à coesão do maciço; forças friccionais - contrariam o movimento devido ao atrito entre superfícies rochosas - e as forças que provocam o deslizamento (peso do material, pressão da água e outras forças estáticas ou dinâmicas que possam influenciar a estabilidade) (Matos Fernandes, 2011).

Um outro método determinístico é o método das tensões-deformações, que têm em conta a relação tensão-deformação do maciço no processo de rotura. Este método pode ser usado alternativamente aos métodos de equilíbrio limite, que admite que a resistência é mobilizada instantaneamente ao longo da superfície de rotura e considera apenas as forças atuantes nesta. O método tensão-deformação considera a evolução das características resistentes do maciço durante a sua deformação e consequente rotura, em que se geram diferentes estados de tensão em várias zonas do talude. Este método permite assim analisar a influência de diversos fatores (tensão instalada no maciço, pressão da água, forças externas) no estado de estabilidade do talude (González de Vallejo et al., 2002).

A análise da estabilidade pode também ser feita depois de se dar a rotura do talude, dando a conhecer o respetivo tipo de instabilidade e mecanismo de rotura; é denominada de *back analysis*.

A escolha do método que melhor se adequa à análise da estabilidade de um talude específico dependerá das propriedades físicas e resistentes do maciço, da quantidade da informação disponível sobre as características geológicas, geomecânicas e hidrogeológicas do material, do nível de detalhe exigido e dos possíveis mecanismos de rotura que poderão ocorrer. Dependendo da informação que se possui, um método poderá ser mais apropriado pois há métodos que requerem mais dados do que outros.

4.3. ESTABILIZAÇÃO DE TALUDES

Concluído o estudo da estabilidade, é necessário tomar medidas de estabilização, caso o talude em questão seja instável, ou seja, corra o risco de sofrer algum tipo de instabilidade.

Para cada tipo de instabilidade referido previamente há diferentes soluções para garantir que se verifica a segurança. Na escolha da melhor solução, há que ter em consideração os fatores geotécnicos que as condicionam, nomeadamente a inclinação do talude, tipo de rocha e o seu grau de alteração, direção das descontinuidades, possibilidade de formação de blocos potencialmente instáveis e a sua possível trajetória. De realçar que estas medidas são indicadas para a estabilidade global do maciço, não sendo específicas para um certo tipo de instabilidade.

Estabilizar o talude corresponde a elevar o seu coeficiente de segurança, o que é conseguido aumentando as forças resistentes ou diminuindo as desestabilizadoras. Isto pode ser feito através da redução de peso na parte superior do talude ou reforçando a base deste, mas existem diversas maneiras de o fazer. Cada caso tem de ser estudado para determinar o método mais adequado, dependendo das características mecânicas e geométricas do talude, do mecanismo de instabilidade a que está sujeito, e dos fatores ambientais que possam provocar qualquer tipo de rotura. As principais medidas são alterar a geometria, realizar obras de contenção, instalar estruturas resistentes e fazer drenagem.

4.3.1. ALTERAÇÃO DA GEOMETRIA DO TALUDE

Esta medida consiste num reperfilamento do talude para que haja uma redistribuição das forças atuantes para uma configuração mais estável. A alteração da geometria pode ser feita através da diminuição da inclinação da face do talude, de modo que a componente estabilizadora do peso aumente e a desestabilizadora diminua.

Outro método de alteração da geometria consiste em eliminar algum peso no topo ou aumentá-lo no pé do talude, o que pode ser feito através da realização de escavações ou aterros. Deste modo, se o peso diminuir no topo do talude, a força desestabilizadora será menor; se o peso no pé do talude for acrescido, a resistência ao deslizamento aumenta. Se for possível, estas duas medidas podem ser feitas no mesmo talude, retirando peso do topo e colocando-o no pé do talude, como é representado na Figura 17.

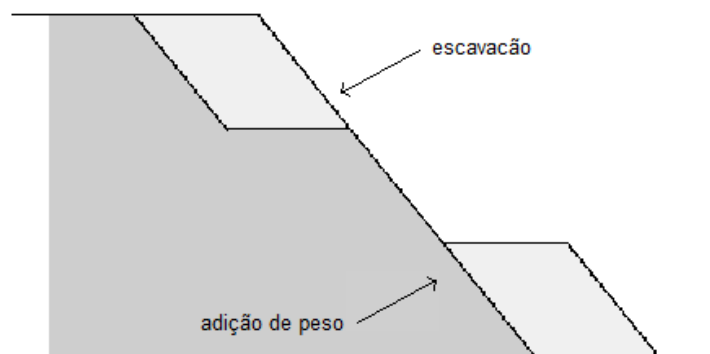


Figura 17 - Alteração da geometria do talude através da remoção de peso no topo e adição na base

Uma outra opção é a construção de banquetas ao longo do talude, que oferecem uma melhor distribuição das forças e podem servir como zona de retenção de detritos provenientes de possíveis instabilidades originadas acima da superfície da banqueteta. Outra utilidade das banquetas é a configuração que dão ao talude, proporcionando zonas onde pode ser realizada drenagem, de modo a evitar o desgaste e a erosão do maciço (González de Vallejo et al., 2002).

No caso do desprendimento de blocos, a construção de banquetas ao longo da face do talude não é uma medida utilizada, pois quando os blocos caem sobre a superfície das banquetas, têm tendência a saltar para fora da face do talude. A Figura 18 mostra a influência da presença de banquetas na trajetória dos blocos. Neste caso, um talude íngreme seria mais seguro, com a construção de uma vala na sua base, como é possível observar. O bloco cai em queda livre, mas sempre próximo à face do talude.

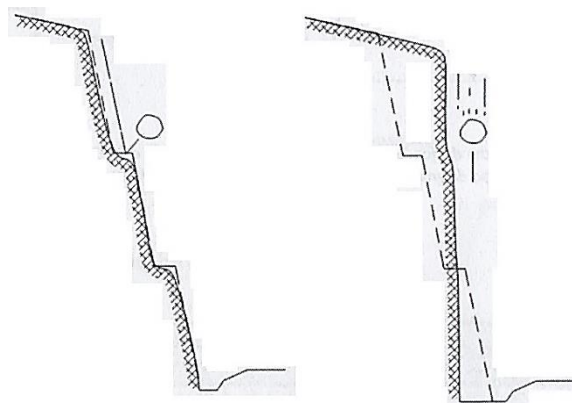


Figura 18 - Influência na trajetória dos blocos da presença de banquetas em taludes (Luis Fonseca, 2010)

Outro aspeto negativo da presença de banquetas em taludes com possibilidade de destacamento de blocos é o facto de se acumularem detritos nas suas superfícies, impossibilitando a retenção dos blocos, logo implicam a manutenção ou limpeza periódica, devendo ter largura suficiente para o fazer.

4.3.2. OBRAS DE CONTENÇÃO

A finalidade das obras de contenção é reforçar o pé do talude para prevenir a degradação nessa zona crítica para a estabilidade; são uma boa solução contra a instabilidade superficial. Alguns exemplos são os muros de gabião e as paredes do tipo Berlim.

Os muros de gabiões são muros de gravidade constituídos por caixas de rede de aço galvanizado preenchidas por brita (Figura 19). Têm a vantagem de serem simples de projetar e de rápida execução, e oferecem uma integração paisagística razoável. As paredes do tipo Berlim podem ser de dois tipos: de betão armado ou perfis metálicos e pranchas de madeira. Outro tipo de solução são os muros de terra armada, que são constituídos por um paramento exterior de painéis de betão armado (geralmente pré-fabricados), solo e armadura.



Figura 19 - Exemplo de um muro de gabião (www.encuentra24.com, 2018)

4.3.3. ELEMENTOS ESTRUTURAIS RESISTENTES

Os elementos estruturais resistentes aumentam a resistência ao corte, melhorando a resistência do maciço na superfície de rotura ou intensificando as forças tangenciais que impedem o deslizamento. As estacas de betão armado, pregagens de aço e colunas de *jet-grout* são exemplos de soluções estruturais que intersejam a superfície de rotura e atingem a parte estável do maciço (Matos Fernandes, 2011). As ancoragens são elementos formados por cabos ou varões de aço que estão amarradas a zonas estáveis do maciço e concedem uma força contrária ao movimento, pois trabalham em tração. São utilizadas normalmente em maciços rochosos fraturados para estabilizar grandes massas de terreno. O dimensionamento destes elementos resistentes depende do esforço a que vão estar sujeitos quando estiverem em serviço. A Figura 20 mostra o esquema pormenorizado de uma ancoragem.

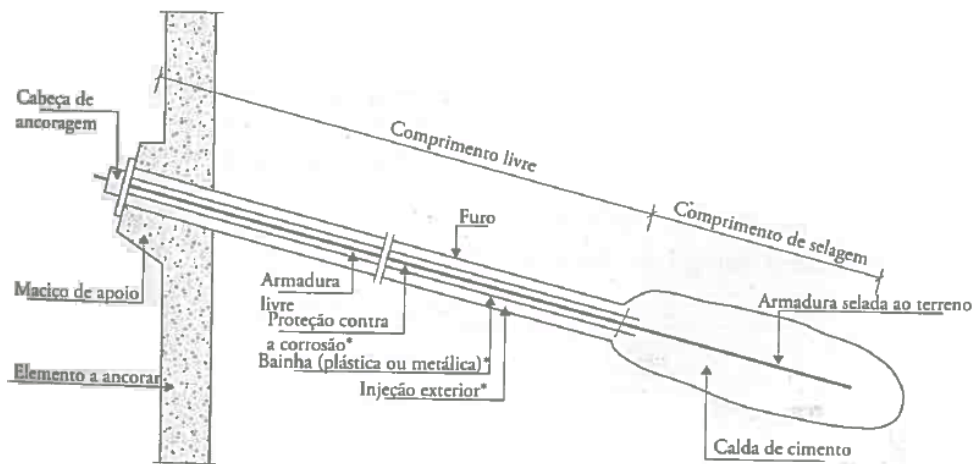


Figura 20 - Esquema pormenorizado de uma ancoragem (Matos Fernandes, 2011)

4.3.4. SISTEMAS DE DRENAGEM

Os sistemas de drenagem têm como objetivo reduzir a pressão da água intersticial (que atua como força desestabilizadora), as forças de percolação e o peso do maciço. A drenagem pode ser do tipo superficial, feita através de redes de valetas, ou profunda, com recurso a galerias de drenagem, poços drenantes e furos de drenagem/drenos; em maciços rochosos é mais comum fazer-se drenagem profunda, pois esta diminui o nível freático.

Sendo a água um dos principais fatores desestabilizadores em taludes, geralmente qualquer solução escolhida terá juntamente a construção de elementos drenantes (Matos Fernandes, 2011).

A presença de vegetação contribui para a estabilidade, como foi referido, pelo que o revestimento vegetal pode ser também uma medida de estabilização, desde que em grau reduzido, pois se for muito extensa (por exemplo, se crescerem árvores), pode tornar-se num fator desestabilizador.

Para a escolha do método ou métodos de estabilização mais apropriados para cada caso, deve ser tido em conta a quantidade de material disponível e os recursos económicos disponíveis, e também a urgência de intervenção. A Figura 21 representa um talude em que estão presentes vários tipos de estabilização: alteração da geometria do talude, drenagem superficial e profunda, ancoragens e revestimento com vegetação.

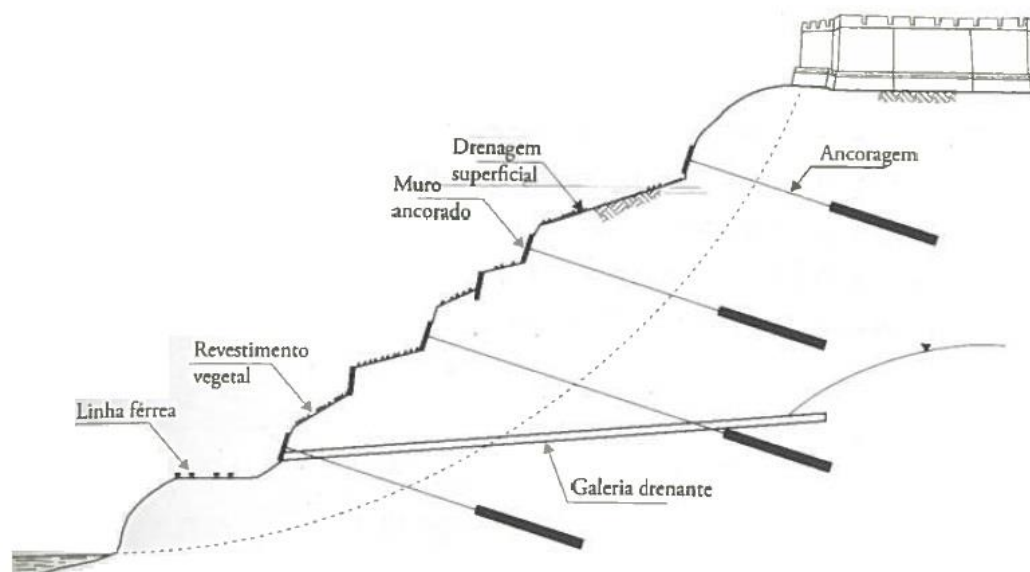


Figura 21 - Talude com diferentes medidas de estabilização: alteração da geometria do talude, drenagem superficial e profunda, ancoragens e revestimento com vegetação (Matos Fernandes, 2011)

4.4. MEDIDAS DE ESTABILIZAÇÃO CONTRA CORRENTES DE DETRITOS

As correntes de detritos são particularmente catastróficas para infraestruturas devido à grande velocidade que atingem e por ser difícil estimar o momento em que se iniciam. Deste modo, torna-se essencial a criação de medidas de proteção e de redução de risco dos fluxos de detritos. As medidas de proteção para este tipo de instabilidade podem-se dividir em dois grupos: as que procuram evitar que o fenómeno ocorra e as que tentam controlar os danos provocados.

Exemplos de medidas de mitigação das correntes de detritos são o reflorestamento, pois a presença de vegetação é favorável à estabilidade do maciço, e a colocação de sistemas de drenagem, porque ao haver menor quantidade de água no talude, a probabilidade da formação destes fluxos será diminuída; estas medidas contribuem também para a redução da erosão do maciço, evitando a formação de blocos rochosos de pequena dimensão que podem ser arrastados pelas correntes. Uma outra opção para atenuar os efeitos deste fenómeno é a construção de reservatórios no fundo das encostas para que os detritos aí fiquem acumulados (Soeters e van Westen, 1996).

Para o controlo dos danos e redução do risco das correntes de detritos existem várias soluções, tais como muros de gabiões ou barreiras rígidas de betão, mas no caso de taludes rochosos a solução mais comum é a colocação de barreiras flexíveis. Estas barreiras são formadas por redes de anéis de aço de alta resistência, capazes de suportar altas cargas estáticas e dinâmicas. Estas barreiras sustentam as pedras e outros detritos enquanto deixam a água passar (Figura 22). Este efeito de drenagem da rede é vantajoso, pois ao permitir que a água flua sem obstáculos, a capacidade de retenção da barreira aumenta significativamente, fazendo com que o material sólido fique depositado atrás da barreira. Podem ser instalados vários níveis de barreiras ao longo de uma encosta, com diferentes dimensões, dependendo da largura da encosta e da quantidade de detritos arrastados pela água. Se necessário, as barreiras podem ser instaladas temporariamente até que a vegetação se volte a desenvolver nas áreas acima da barreira propensas à formação de fluxos. Depois de a encosta se encontrar novamente revestida de vegetação, a barreira pode ser removida, deixando a fundação intacta (Luis Fonseca, 2010).



Figura 22 - Exemplo de uma barreira flexível para proteção contra correntes de detritos (www.geoverticalsrl.com, 2018)

Outro tipo de estruturas de retenção são os diques, construídos transversalmente à encosta, que podem ser de betão, de elementos metálicos pré-fabricados, de terra (aterros) de gabião, entre outros.

4.5. MEDIDAS DE ESTABILIZAÇÃO CONTRA DESPRENDIMENTO DE BLOCOS

Em relação ao desprendimento de blocos, existem diversos tipos processos de estabilização: o primeiro grupo engloba os métodos que procuram fixar os blocos instáveis no maciço recorrendo a ancoragens ou pregagens para prevenir a sua queda; o segundo grupo abrange os métodos que não evitam a queda dos blocos, mas reduzem o risco de estes atingirem infraestruturas, estradas ou habitações. Existem ainda outros métodos de estabilização de maciços rochosos que consistem em remover os blocos instáveis. A escolha do processo de estabilização depende de diversos fatores como as características do talude, o risco de desprendimento, a quantidade e dimensões dos blocos, inclinação do talude, grau de alteração do maciço, etc. (Ortigao e Sayao, 2013).

4.5.1. ESTABILIZAÇÃO ATRAVÉS DA REMOÇÃO DE BLOCOS

Segundo Wyllie e Mah (2004), a estabilização de taludes rochosos pode ser conseguida através da remoção de blocos potencialmente instáveis. De um modo geral, a remoção de blocos é o método de estabilização preferível pois elimina o problema da ocorrência de desprendimentos e, em alguns casos, não requer futuras obras de manutenção. Porém, este método só deve ser aplicado quando se sabe que a nova face do talude será estável, logo não deve ser feito em rochas muito degradáveis, como por exemplo o xisto. A Figura 23 mostra diferentes métodos de remoção de blocos: *resloping*, *trimming* e *scaling*.

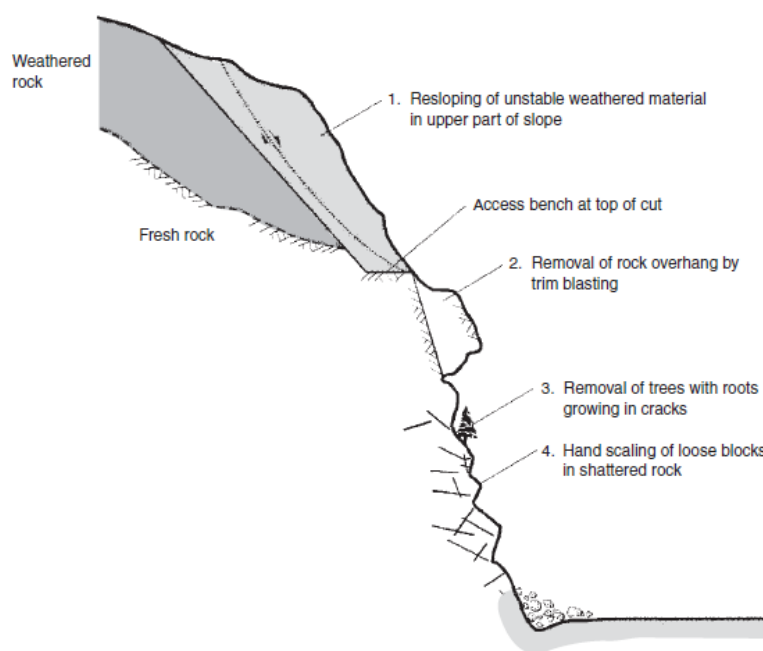


Figura 23 - Talude com possibilidade de destacamento de blocos com diferentes medidas de estabilização através da remoção de blocos (Soeters e van Westen, 1996)

Resloping - este processo de estabilização consiste em criar uma nova face do talude na zona onde se encontram os blocos potencialmente instáveis. Quando se encontra rocha muito fragmentada na parte superior do talude, deve-se “cortar” esta zona com um ângulo que garanta a estabilidade (fator de segurança maior ou igual a 1), como está representado na Figura 23 (caso 1). Um aspeto a considerar neste tipo de remoção de blocos é a fragmentação do maciço que ocorre ao longo dos anos posteriores à obra, que pode resultar numa nova intervenção, por isso deve ser feita uma banquetta para servir acesso ao equipamento e para recolher os detritos que possam aí estar depositados. Geralmente este processo é feito com recurso a escavadoras, por isso a largura do corte deve ser dimensionada para permitir uma intervenção adequada do equipamento, sem perigo de colapso da rocha mais fragmentada.

Trimming - remoção de partes do maciço que formam saliências na face do talude (caso 2 na Figura 23), que é feita normalmente com recurso a explosivos, causando pequenas explosões que não danificam o maciço.

Scaling - remoção manual de blocos soltos, solo ou vegetação da face do talude. Os blocos de grandes dimensões podem ser quebrados para diminuir o seu volume (por exemplo com explosivos), antes de serem removidos (Figura 23 - caso 4). Em encostas muito íngremes os trabalhadores podem ser suportados por uma corda, ancorada no topo do talude, ou suspensos de uma grua.

Nos casos em que as operações de remoção de rocha são realizadas em taludes próximos de estradas ou caminhos de ferro, o trânsito deve ser interrompido até o local estar seguro e não haja perigo de queda de detritos.

4.5.2. ESTABILIZAÇÃO ATRAVÉS DO REFORÇO DE BLOCOS

O reforço de blocos serve para segurar os mesmos no maciço, reduzindo a probabilidade de estes se desprenderem; pode ser feito através da colocação de ancoragens, pregagens, betão projetado,

contrafortes, etc. Estes métodos reforçam o maciço de maneira a que os blocos não sofram desprendimentos mesmo quando decorrem escavações. A Figura 24 representa algumas medidas deste tipo de estabilização.

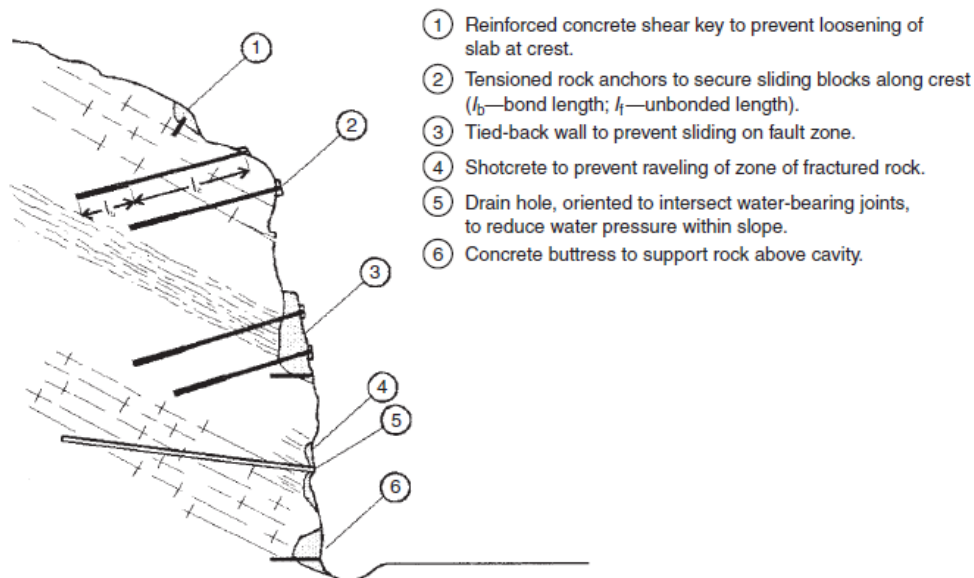


Figura 24 - Talude com possibilidade de destacamento de blocos com diferentes medidas de estabilização através do reforço de blocos (Soeters e van Westen, 1996)

Ancoragens - evitam que o bloco se desprenda do talude, aplicando uma força de tração de pré-esforço (Figura 24 - caso 2). Esta é uma medida de estabilização ativa, pois as ancoragens aplicam constantemente uma força estabilizadora no maciço. Uma das funções das ancoragens em maciços rochosos é de aumentar a componente normal atuante nos planos de escorregamento, contribuindo para a estabilidade do maciço. São instaladas ao longo das zonas potencialmente instáveis e fixadas na rocha sã que se encontra no interior do maciço. A aplicação de uma força de tração na ancoragem provoca uma reação contrária de compressão na massa rochosa, alterando assim a distribuição das forças atuantes nas superfícies de escorregamento entre a rocha intacta e os blocos. Para o dimensionamento de ancoragens é necessário determinar a força a transmitir à ancoragem e a inclinação com que é colocada, assim como o comprimento e diâmetro da ancoragem.

Pregagens - varões de aço que intersejam as discontinuidades entre os blocos e a parte estável do maciço, impedindo o desprendimento do bloco. Diferenciam-se das ancoragens pois são uma medida de estabilização passiva, devido ao facto de não aplicarem uma força estabilizadora no maciço, apenas entrando em ação após os blocos sofrerem deslocamento.

Betão projetado - aplica-se em taludes muito fragmentados que originam blocos instáveis de pequeno volume, e em zonas do maciço fraturadas, onde surgem pequenas fendas na face do talude que podem ser preenchidas por uma camada de betão projetado (Figura 24 - caso 4). Como medida de estabilização global do talude não é adequado, pois não oferece muita proteção contra o deslizamento, mas sim para proteger a superfície fraturada do maciço. Se a aplicação for permanente, para evitar que surjam falhas, o betão deve ser reforçado com malhas metálicas ou fibras de aço, por exemplo. Deve sempre ser feita drenagem juntamente com esta aplicação, através de furos que atravessam a camada, para evitar pressão da água no betão projetado (Ortigao e Sayao, 2013).

Contrafortes - quando a fragmentação do maciço provoca uma cavidade na face do talude, deixando blocos de grande volume sem apoio, podem ser construídos contrafortes para os suportar e evitar que se desprendam e caiam. Os contrafortes têm duas funções: segurar as zonas de rocha fraca e sustentar o peso da rocha sobrejacente. Devem ser projetados de modo a que a direção da reação do maciço suporte o contraforte em compressão. Deste modo, não é necessário reforçar o betão pois os momentos fletores são anulados (Wyllie e Mah, 2004). Os contrafortes são ancorados ou pregados à rocha sã do maciço para evitar escorregamento. A Figura 25 mostra uma situação em que foi necessário estabilizar um bloco de grandes dimensões através da construção de contrafortes.

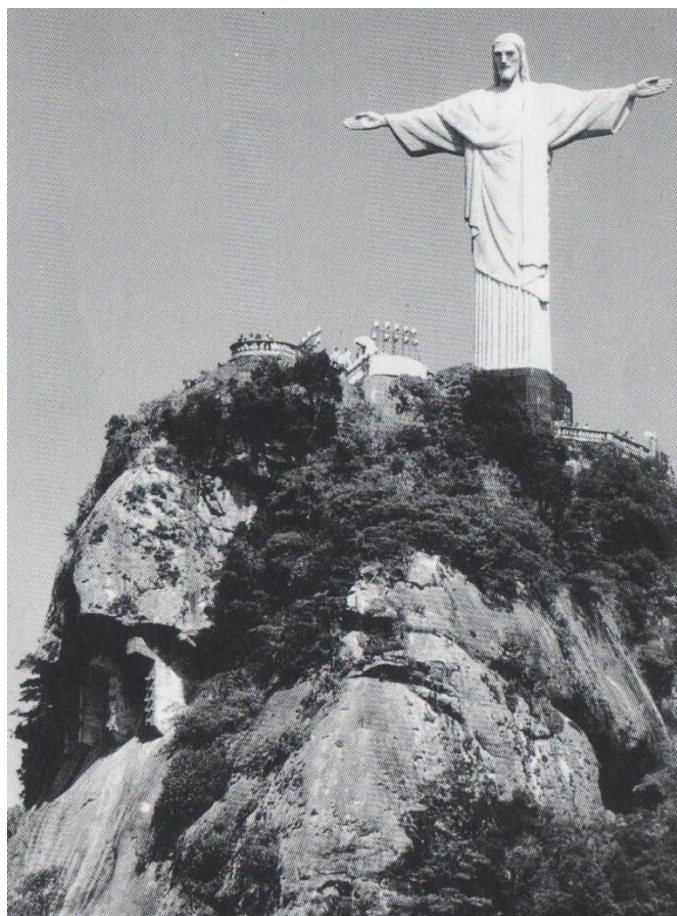


Figura 25 - Estabilização de um bloco instável com recurso a contrafortes (canto inferior esquerdo), Rio de Janeiro (Ortigao e Sayao, 2013)

Outro tipo de reforço de blocos consiste em fazer o calçamento com betão em zonas com blocos instáveis, fixando-os com uma pregagem ou ancoragem. A Figura 24 (exemplo 1) representa uma situação em que foi executado este tipo de reforço para estabilizar a zona do topo do talude (*shear keys*). Primeiramente é feita a pregagem, que deve alcançar a zona estável do maciço, e de seguida é colocado o betão envolvendo totalmente a pregagem, ao contrário do método tradicional, em que a mesma é simplesmente pregada no maciço. Este método é utilizado quando a rocha no topo do talude está muito fraturada e os blocos formados são muito pequenos; nestes casos, o desgaste do maciço pode levar a que a cabeça da pregagem fique exposta, perdendo parte do sustento que fornece ao maciço (Wyllie e Mah, 2004).

O calçamento também pode ser feito através de uma parede de betão armado na face do talude, quando existem descontinuidades na zona onde vão ser feitas as ancoragens (ver Figura 24 - exemplo 3). Devido à degradação do maciço rochoso na cabeça da ancoragem, esta sofre uma alguma perda de pré-esforço. Neste caso, a parede de betão é construída para cobrir a área da rocha fraturada, e depois são instaladas as ancoragens. A parede tem a função de proteção contra a queda de blocos fornecendo também uma força de reação elevada em resposta à ancoragem. Pode ser feita com betão projetado, se necessário. Deve ser sempre feita drenagem para evitar instabilidade devido às pressões da água.

Nos casos em que exista uma cavidade na face do talude, deixando um bloco de grandes dimensões sem apoio, pode ser colocado um maciço de recalçamento, para impedir que o bloco tenha movimento; este maciço é normalmente feito com pedra e argamassa, o que lhe atribui um impacto paisagístico reduzido.

4.5.3. MEDIDAS DE PROTEÇÃO

Nos casos em que os taludes com possibilidade de destacamento de blocos são muito altos e escarpados, a estabilização torna-se difícil ou mesmo impossível. Então, não sendo possível implantar as medidas de estabilização referidas anteriormente, devem ser tomadas medidas de proteção. Estas medidas procuram evitar que a queda de blocos traga danos à população e infraestruturas. No entanto, não têm como objetivo eliminar a ocorrência deste evento, mas sim controlar os seus efeitos através da construção de estruturas protetoras. Estas medidas consistem em deter os blocos em queda ou redirecioná-los para zonas sem risco para a população.

O desprendimento de blocos é um fenómeno de instabilidade que pode causar a queda de pedras de alturas de dezenas de metros de blocos de grande volume, atingindo velocidades e energias muito elevadas. Sendo assim, é imperativo a implantação de medidas para a diminuição do risco e prevenção do desprendimento de blocos em taludes, as quais se apresentam de seguida. Segundo Wyllie (2015), a escolha da melhor solução depende de três condições:

- Energia cinética - a massa e a velocidade dos blocos durante a trajetória da queda definem a energia cinética. A massa dos blocos depende das características das descontinuidades do maciço rochoso (espaçamento e volume dos blocos que se podem formar). A resistência do maciço também tem influência na energia, pois as rochas mais fracas têm tendência a partir com o impacto do choque com a face do talude, ou seja, a sua massa não será constante ao longo da queda, enquanto que rochas mais resistentes têm mais probabilidade de manter a massa durante a queda. A velocidade dos blocos depende da altura do talude, da inclinação e do material constituinte do maciço (tipo de rocha, presença de vegetação, etc).
- Geometria do talude - a inclinação e altura do talude são parâmetros importantes a ter em consideração na escolha da melhor solução e das respetivas dimensões. A distância entre a base do talude e a infraestrutura a proteger do desprendimento de blocos delimita a área disponível para a construção da estrutura protetora. Se a base do talude não tiver espaço suficiente para ser instalada a medida de proteção, então esta terá de ser construída na face do talude; por outro lado, caso a face do talude seja de difícil acesso, então a estrutura deverá ser instalada no pé do talude.
- Custo da obra - o custo da construção de uma estrutura protetora deve ser consistente com o custo estimado no caso de os blocos atingirem a infraestrutura que deve ser protegida. Deve ser feita uma comparação entre as possíveis soluções em relação ao custo total de cada uma, sendo este o custo da construção mais o custo estimado de uma eventual queda de blocos que possa

provocar paragem do trânsito, danos a equipamentos ou à população, ou obras de estabilização do talude.

4.5.3.1. Valas no pé do talude

Uma solução possível para o desprendimento de blocos é a construção de uma vala no pé do talude; os blocos descem ao longo da encosta e caem na vala, para serem imobilizados e não atingirem zonas mais afastadas do pé do talude, desde que se disponha de largura suficiente para isso. São soluções de custo reduzido, de simples dimensionamento e construção, e que oferecem uma proteção razoável contra a queda de blocos, para além de exigirem pouca manutenção. É uma boa opção nos casos em que o acesso ao talude é difícil, sendo possível retirar os blocos que ficam acumulados na vala. A largura das valas depende da inclinação do talude, pois esta afeta a distância que os blocos vão alcançar na base do talude. Em taludes de pequena inclinação, os blocos têm tendência a rolar ao longo da encosta até à vala, ou seja, neste caso, é provável que os blocos acabem a sua trajetória na vala. Para taludes com maior inclinação, o movimento será de salto e rolamento, o que fará com os blocos atinjam zonas mais afastadas do pé do talude; neste caso, a largura da vala terá de ser maior. No caso de taludes muito íngremes ou aproximadamente verticais, os blocos tendem a ter um movimento de queda livre e a cair junto da face do talude. A altura do talude influencia também as dimensões das valas, pois com o aumento da altura, a velocidade da queda e a distância ao pé do talude serão maiores, logo a vala deverá ser mais larga. Para evitar que os blocos ressaltem quando caem na superfície da vala, esta deve ser coberta com uma camada de areia ou cascalho para amortecer o choque. Podem ainda ser complementadas com uma barreira rígida ou um aterro de pequenas dimensões do lado da via ou da estrutura a proteger para impedir que os blocos ultrapassem a largura da vala (Wyllie e Mah, 2004). Um esquema de uma vala no pé do talude é apresentado na Figura 26.

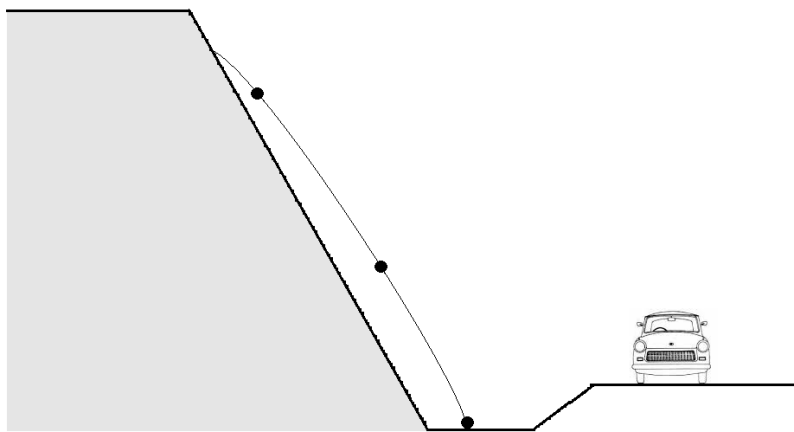


Figura 26 - Esquema de uma vala no pé do talude

O dimensionamento de valas pode ser feito através do gráfico presente na Figura 27, desenvolvido por Ritchie (1963) a partir de observações em campo. Em função da altura e inclinação do talude, é possível determinar a largura e profundidade necessárias para a vala conter os blocos que se desprendem de um dado talude.

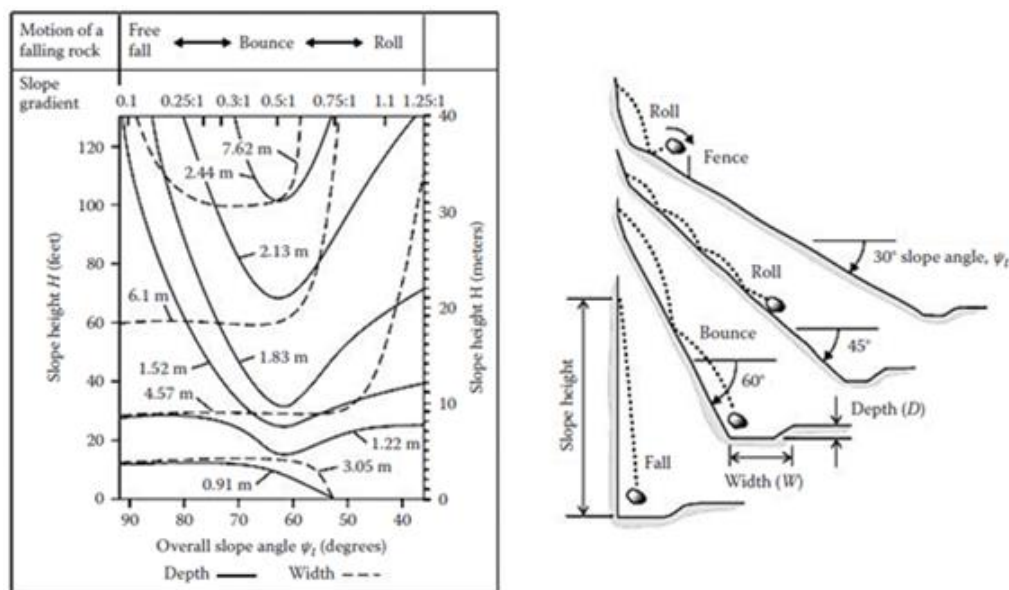


Figura 27 - Diagrama para dimensionamento de valas em função da altura e inclinação do talude (Ritchie, 1963)

Outro método de dimensionamento de valas é através do quadro 3, desenvolvida por Peckover e Kerr (1977) com base na sua experiência em estradas no Canadá, e que, igualmente ao método anterior, propõe valores para as dimensões da vala em função da altura e inclinação do talude.

Quadro 3 - Quadro para dimensionamento de valas em função da altura e inclinação do talude (Peckover e Kerr, 1977)

Inclinação do talude	H (m)	W (m)	D (m)
Quase vertical	5 - 10	4	1
	10 - 20	5	1.2
	> 20	6	1.2
0.25:1 ou 0.3:1	5 - 10	4	1
	10 - 20	5	1.2
	20 - 30	6	2
0.5:1	> 30	8	2
	5 - 10	4	1.2
	10 - 20	5	2
0.75:1	20 - 30	6	2
	> 30	8	2.5
	5 - 10	4	1
1:1	10 - 20	4	1.2
	> 20	5	2
	5 - 10	4	1
	10 - 20	4	1.5

4.5.3.2. Redes metálicas

Nas situações em que a construção na base e/ou na face do talude é difícil, a proteção contra a queda de blocos pode ser feita através da colocação de redes ou malhas de aço. Têm as vantagens de serem de elevada resistência, flexíveis, simples de montar e são uma solução económica. As redes podem ser suspensas ou pregadas, sendo que as redes suspensas são mais usadas para controlar a trajetória dos blocos, impedindo que se afastem da face do talude, e as redes pregadas procuram impedir que o bloco se desprenda do maciço. Um exemplo de uma rede metálica é representado na Figura 28.



Figura 28 - Exemplo de uma rede suspensa (Geobrugg, 2018)

As redes suspensas são as mais simples: são ancoradas no topo do talude e penduradas de maneira a cobrir a totalidade da face do talude, não sendo presas nesta zona, e abertas junto à base para os blocos caírem num espaço onde podem ser recolhidos, impedindo que se afastem demasiado da encosta. Um esquema deste tipo de rede está representado na Figura 29. O seu peso e flexibilidade permitem que a rede permaneça junto à face do talude, de modo a evitar que os blocos alcancem velocidades elevadas e que a danifiquem. Por vezes podem ser presas na parte inferior do talude para garantir que os blocos se acumulam junto à encosta. Se necessário, por exemplo se houver uma estrada à beira do talude, pode ser também construída uma vala (se a berma tiver espaço suficiente) para que os blocos não interfiram com o trânsito (Luis Fonseca, 2010). Para blocos de grandes dimensões, a malha deverá ser mais forte, assim como em taludes quase verticais, nos quais o peso da malha pendurada ao longo da face do talude é uma carga significativa. Para menores inclinações a malha poderá ser menos resistente, pois encontra-se parcialmente pousada na face do talude (Wyllie, 2015).

Estas redes têm a vantagem de ter uma instalação relativamente simples, sendo necessário executar elementos de ancoragens apenas na parte superior do talude. Se houver possibilidade de desprendimento de blocos na zona acima do ponto onde a rede é presa, esta deve ser montada um pouco acima do terreno (se for possível), como está representado na Figura 29, de modo a conter os blocos que venham de cima.

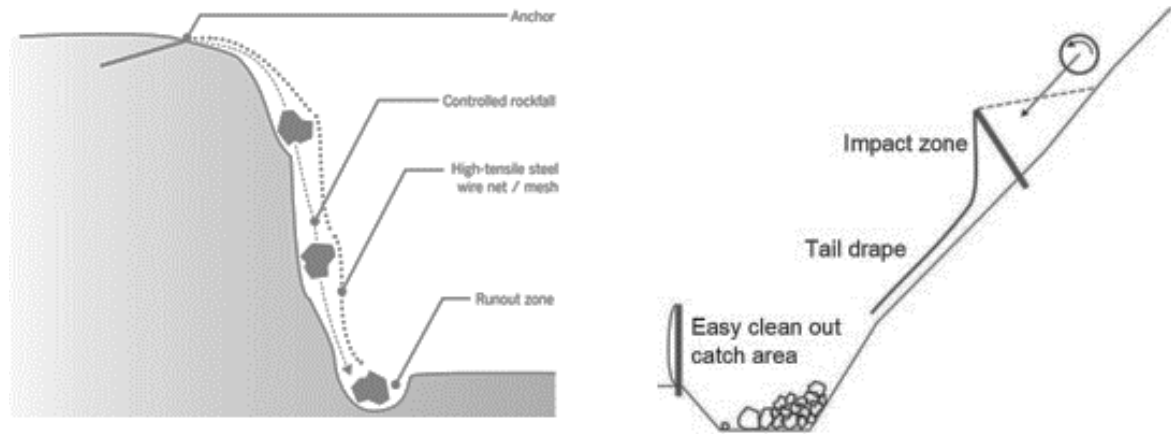


Figura 29 - Esquemas de redes suspensas (Geobrugg, 2018)

As redes pregadas são fixadas à face do talude com pregagens espaçadas ao longo da malha, que ajudam a segurar os blocos instáveis e a contribuir para a estabilidade do talude. São úteis nos casos em que não existe espaço junto ao pé do talude para uma área onde os blocos se podem acumular; neste caso, a rede deve segurar os blocos na face do talude quando estes se desprendem. A Figura 30 mostra a representação de uma rede pregada, em que se pode observar que as pregagens seguram a rede junto ao terreno, impedindo o bloco potencialmente instável de se mover.

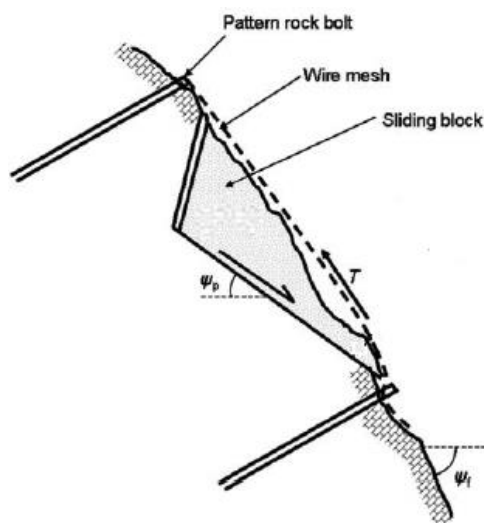


Figura 30 - Esquema representativo do funcionamento de uma rede pregada (adaptado de Wyllie, 2015)

O dimensionamento de uma rede pregada envolve o uso de equações de equilíbrio nas quais a força de escorregamento do bloco deslizante é contrariada pela força tangencial mobilizada na superfície de deslizamento e pela força de tração que a malha transmite ao talude. Para o dimensionamento das redes é também necessário conhecer as características das discontinuidades do maciço que permitem determinar a forma e dimensões dos blocos que se podem formar, e assim dimensionar as pregagens.

Uma vantagem destas redes é o seu bom comportamento na ocorrência de um sismo, devido à sua flexibilidade; a malha oferece resistência ao talude durante o sismo devido às pregagens e contém os

blocos que possam cair. Se necessário, podem ser complementadas com uma camada de betão projetado para uma maior estabilidade do talude (Volkwein et al., 2011).

Apesar de serem constituídas por metal e cobrirem toda a área da encosta em que há formação dos blocos potencialmente instáveis, as redes metálicas integram-se bem no meio envolvente, para além de que a presença de vegetação faz com que sejam relativamente camufladas.

Hoje em dia existe no mercado uma enorme variedade de redes para proteção contra o desprendimento de blocos. Para fazer uma escolha ponderada deve ser tido em consideração o custo das redes, o custo da instalação, que depende do espaçamento das pregagens (quanto menor o espaçamento, mais pregagens serão precisas, logo maior será o custo), a resistência da malha, dependendo de cada caso, pois há situações que requerem redes mais resistentes e pesadas do que noutros casos.

4.5.3.3. Barreiras rígidas

As barreiras rígidas ou estáticas são estruturas de elementos rígidos e com grande inércia, que são colocadas na base das encostas em que há possibilidade desprendimento de blocos, impedindo-as de alcançar a estrada ou infraestrutura situada junto ao talude.

Os muros de gabiões são um exemplo de barreiras rígidas; são constituídos por caixas de rede de aço galvanizado preenchidas por brita. A vantagem deste tipo de proteção é o facto de a flexibilidade da rede de aço permitir que o muro retenha alguma energia dos blocos. Os muros de gabiões têm também as vantagens de poderem ser construídos no local da obra, reduzindo os custos de transporte dos materiais, e permitirem que a vegetação se desenvolva, contribuindo para a sua integração paisagística. Têm a desvantagem de, no caso de danos na rede de aço, o seu reparo seja difícil de executar (Wyllie, 2015).

Os muros de gabiões podem ser utilizados juntamente com outras medidas de proteção. A Figura 31 mostra uma situação de queda de blocos com a instalação de uma vala e de muro rígido de gabião.

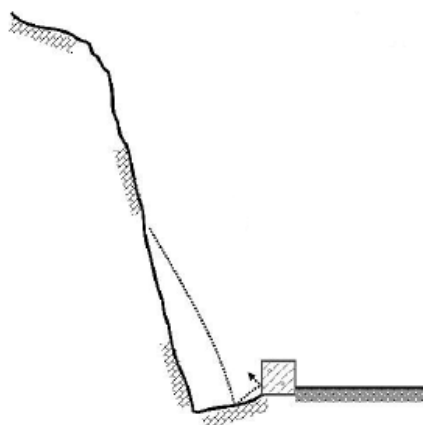


Figura 31 - Exemplo de duas medidas de proteção contra o desprendimento de blocos: vala no pé do talude e muro de gabião (adaptado de Wyllie, 2015)

Outro tipo de barreiras rígidas que podem ser utilizadas para este tipo de instabilidade são as barreiras metálicas (Figura 32). Existe uma grande variedade de barreiras metálicas, mas normalmente são constituídas por perfis de aço, ligados entre si por malhas de arame ou redes eletrosoldadas. São práticas

devido à sua fácil montagem, e são normalmente utilizadas para impactos de baixa energia, pois a sua capacidade de absorção de energia é reduzida (Luis Fonseca, 2010).



Figura 32 - Exemplo de uma barreira rígida metálica (www.hitechrockfall.com, 2018)

Existem também barreiras formadas por perfis de aço e pranchas de madeira, porém estas não são uma boa opção pois não resistem aos impactos dos blocos devido ao seu material constituinte. Podem ser utilizadas como medida temporária em locais onde a madeira seja abundante; porém, noutras situações não são recomendadas. Os muros de betão também não são uma medida de proteção eficaz neste tipo de situações em que os blocos adquirem elevada velocidade e energia; os blocos perdem a sua energia no choque com o muro, mas provocam danos permanentes na estrutura, devido ao facto de esta não se poder deformar.

As barreiras de terra mecanicamente estabilizada, ou MSE (*mechanically stabilized earth*), são uma boa opção para proteção contra queda de blocos, devido à grande capacidade de energia que têm e à sua fácil construção. Segundo a empresa *Maccaferri*, já foram construídas barreiras deste tipo até 15 metros de altura e com capacidades até 20.000 kJ, que são níveis de energia muito elevados. As barreiras são constituídas por solo reforçado e material de revestimento, capaz de aguentar o impacto dos blocos. A Figura 33 mostra um esquema deste tipo de barreiras.

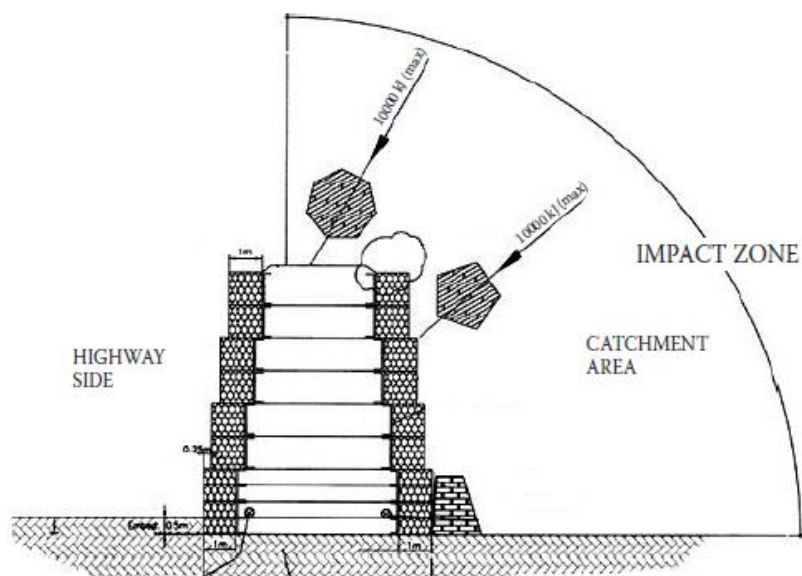


Figura 33 - Esquema de uma barreira do tipo MSE (adaptado de Wyllie, 2015)

O material no interior da barreira é solo granular (drenante) e é compactado para aumentar a densidade e massa da barreira, de modo a melhorar a sua resistência ao corte e absorção de energia. Os elementos do revestimento têm a função de segurar o solo no interior da barreira, distribuir a força do impacto dos blocos ao longo da sua área e de aguentar o impacto sem danificar o resto da estrutura. O revestimento é normalmente feito com gabiões, pois conseguem absorver a energia do impacto, mas pode também ser de betão. Em alguns casos a barreira pode ser protegida com sacos de areia do lado da encosta para absorver energia, e que podem ser facilmente substituídos em caso de danos (Figura 34). O reforço do solo é feito com grelhas plásticas ou geossintéticos ou com malhas de aço, e é ligado aos elementos de revestimento.

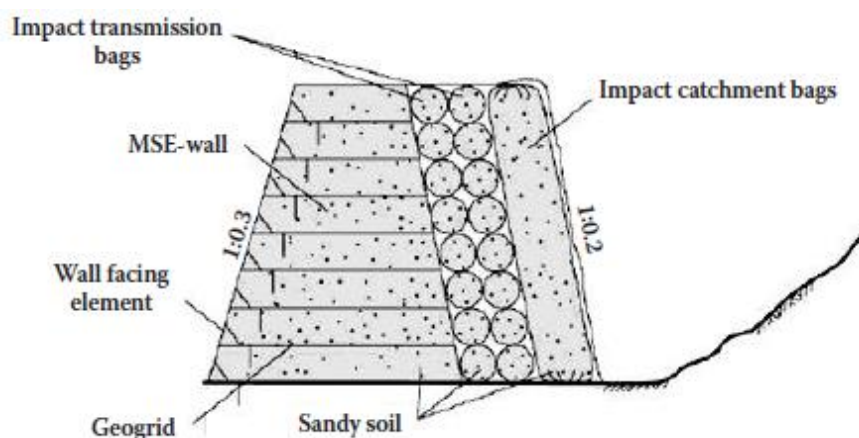


Figura 34 - Esquema de uma barreira do tipo MSE protegida com sacos de areia (adaptado de Wyllie, 2015)

A capacidade de energia das barreiras MSE depende das suas dimensões e método construtivo, logo a altura e largura da barreira são dimensionadas para o nível de energia exigido pela barreira. A resistência

da barreira depende da sua massa, pois esta deve ser suficiente para evitar deslocamentos devido ao impacto dos blocos e do comportamento do material face às cargas a que é sujeito, pois deve ser capaz de se deformar plasticamente na zona do impacto enquanto que o resto da estrutura permanece intacta.

A principal desvantagem do uso destas barreiras é o espaço que ocupam; a barreira necessita de espaço para a sua fundação e de uma zona onde os blocos são depositados entre a barreira e o talude. Muitas vezes não existe espaço suficiente entre o talude e a estrada ou infraestrutura a proteger, e por isso o uso destas barreiras não é frequente. Nos casos em que existe espaço disponível para a sua construção, estas barreiras são uma escolha económica, em termos da sua construção e manutenção (Wyllie, 2015).

4.5.3.4. Barreiras flexíveis

As barreiras flexíveis ou dinâmicas são práticas em situações de desprendimento de blocos em que os mesmos atingem velocidades e energias elevadas ao longo da sua trajetória. Nestes casos, a colocação de uma vala ou de uma barreira rígida pode não ser adequada devido à velocidade com que os blocos chegam ao pé do talude, podendo ultrapassar a barreira ou a zona de acumulação dos blocos, no caso da vala. As barreiras dinâmicas são uma boa opção neste tipo de situação pois podem ser colocadas em qualquer ponto da encosta, perpendicularmente à trajetória dos blocos, conseguindo assim detê-los antes que cheguem à estrada ou outra infraestrutura na base do talude; os blocos são intercetados e ficam retidos atrás da barreira. Se não for possível contruir uma barreira na face do talude, de modo a interromper a trajetória dos blocos, a barreira pode ser colocada junto à via ou infraestrutura, sobre um muro de betão ou de gabião (Duffy, 1992). A Figura 35 mostra uma situação em que foi necessária a colocação de barreiras flexíveis, de modo a que os blocos desprendidos do talude não conseguissem atingir a via.



Figura 35 - Exemplo de um talude com instalação de barreiras flexíveis (Geobrugg, 2018)

A principal característica destas barreiras é o facto de serem flexíveis, ou seja, são livres de se deformar com o impacto dos blocos, absorvendo a energia cinética dos mesmos por deformação plástica. São

constituídas por uma rede de anéis de aço de alta resistência sustentada por postes metálicos igualmente espaçados ao longo do comprimento da barreira. Para evitar a passagem de pequenas pedras através da rede, pode ser colocada sobre esta uma malha secundária de aço ou arame, que serve também para proteger a malha principal. Os postes que seguram a rede são presos a cabos de aço ancorados ao maciço e contêm elementos de frenagem. Durante o impacto entre um bloco e a barreira, a energia dos blocos é transferida da rede para os cabos e para as ancoragens; as ancoragens têm o objetivo de transmitir as cargas de tração ao terreno. Quando a energia se aproxima da capacidade máxima da rede, o elemento de frenagem no cabo começa a funcionar, aumentando o tempo da colisão entre o bloco e a barreira, dissipando ainda mais energia e melhorando a capacidade de absorção energética da barreira. Os elementos de frenagem mais comuns consistem em anéis metálicos, denominados de freios de fricção, que são instalados no cabo e dissipam energia por fricção. Na Figura 36 é possível observar um esquema deste tipo de barreira.

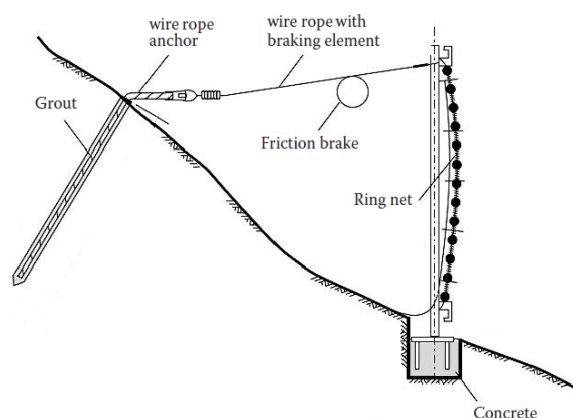


Figura 36 - Esquema de uma barreira flexível (adaptado de Wyllie, 2015)

A fundação da barreira é feita com betão e solidarizado com o talude por intermédio de pregagens de varão selados com calda de cimento. A base pode ser rígida ou articulada. No caso da base rígida, os postes transferem as forças do impacto para a fundação, exigindo que esta seja mais forte e robusta. Se a base for articulada (Figura 37), os postes funcionam como elemento de suporte, sob baixa carga axial e permitindo a rotação em redor de uma articulação que possuem na base (Luis Fonseca, 2010). A base articulada tem a vantagem de não provocar danos à fundação quando o poste se deforma.

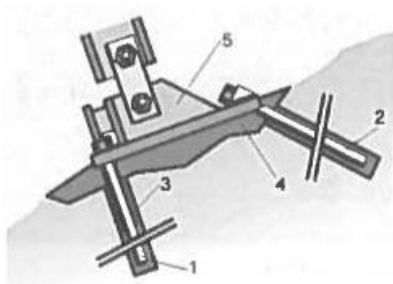


Figura 37 - Esquema de uma base articulada (Luis Fonseca, 2010)

Os parâmetros de dimensionamento deste tipo de barreira de proteção são a energia atingida pelos blocos, com base na massa e velocidade dos mesmos, e a altura de ressalto dos blocos, em função da sua trajetória; estes parâmetros podem ser calculados através de equações do movimento ou da modelação da queda de blocos, um método bastante mais prático. Para além do dimensionamento, é preciso determinar a localização ideal para a barreira no perfil transversal do talude, e também a sua inclinação. A escolha da melhor posição das barreiras é acompanhada de muitas dificuldades, devido à impossibilidade de determinar corretamente diversos parâmetros, tais como o ponto em que se originam os desprendimentos, a trajetória, velocidade e energia dos blocos, o local onde se vão imobilizar, as suas dimensões e a influência que o material constituinte do maciço pode ter na trajetória.

As barreiras flexíveis são normalmente colocadas em taludes de inclinação média, para blocos com movimento de salto ou rolamento; a construção de uma barreira num talude muito íngreme ou vertical implicaria uma capacidade energética muito grande e uma força de pré-esforço bastante elevada para conseguir sustentar os blocos que cairiam em queda livre.

Este tipo de proteção tem a vantagem de ter uma grande capacidade de absorção de energia, oferecendo uma solução segura contra a queda de blocos. Têm a desvantagem de ter uma instalação que requer o uso de gruas ou de helicópteros, o que significa um custo de instalação mais elevado. Exigem alguma manutenção, nomeadamente nos casos em que seja necessário reparar algum dos componentes da barreira ou substituir o elemento de frenagem, depois de ocorrer queda de blocos, sendo também necessário removê-los de trás da barreira de modo a que esta continue funcional para proteger contra o desprendimento de blocos.

4.5.3.5. Atenuadores

Os atenuadores são estruturas que combinam barreiras flexíveis com cortinas de malhas metálicas. A barreira absorve parte da energia no impacto e a malha direciona os blocos para uma zona adequada onde estes são depositados. A parte superior do sistema de atenuador interceta a trajetória dos blocos, e de seguida estes são orientados para a base do talude através da cortina de malha; na base do talude, os blocos e outros detritos são acumulados numa zona própria para isso, e podem ser retirados daí periodicamente. Os atenuadores têm esta denominação pois não interrompem a trajetória dos blocos, absorvendo apenas uma parte da energia no impacto, ao contrário das barreiras flexíveis, que absorvem toda a energia e imobilizam o bloco. Isto porque nas barreiras flexíveis, os blocos chocam com a barreira num ângulo perpendicular à sua superfície, enquanto que nos sistemas de atenuadores este ângulo é menor, o que significa que apenas parte da sua energia é absorvida pelo sistema, o que é vantajoso pois evita danos permanentes na estrutura.

Este sistema tem a vantagem de não precisar de uma intervenção complicada para retirar os blocos e detritos, pois estes são situados numa zona de fácil acesso, reduzindo os custos de manutenção. Porém, é necessário que haja condições para a sua instalação, pois pode não haver uma zona para onde os blocos possam ser direcionados na base do talude.

4.5.3.6. Abrigos e coberturas

Em taludes muito inclinados com estradas ou caminhos de ferro na sua base sem espaço suficiente para a construção de alguma das medidas de proteção anteriormente abordadas, existe outro tipo de solução, que consiste em construir um abrigo para a via que conduz os blocos por cima da mesma, impedindo-os de a atingir. Estes abrigos podem ser feitos através da construção de túneis falsos (denominados de

rock sheds) ou de barreiras de proteção. A Figura 38 mostra um exemplo de uma destas estruturas de proteção.



Figura 38 - Exemplo de um abrigo contra queda de blocos, ou *rock shed* (Wikimedia commons, 2018)

Os túneis falsos têm uma estrutura semelhante a um túnel comum, porém não têm a mesma finalidade, pois não servem para otimizar a utilização do espaço nem vencer inclinações elevadas, sendo construídos apenas para proteger os veículos da queda de blocos. São geralmente feitos com betão armado e revestidos com uma camada de areia por cima para absorver energia da queda dos blocos. A Figura 39 (esquerda) representa o esquema de um túnel falso em betão. Este abrigo é composto por um muro de contenção, com cascalho a preencher o espaço entre esta e a face do talude, colunas de betão pré-fabricadas no lado oposto ao talude e vigas de betão pré-fabricadas, suportando uma camada de areia que absorve energia do impacto dos blocos. Nos casos em que não é possível construir fundações adequadas a este tipo de estrutura, devido ao maciço estar muito fragmentado ou não existir espaço suficiente, os túneis podem ser substituídos por estruturas encastradas, com o abrigo em consola (Figura 39 - direita).

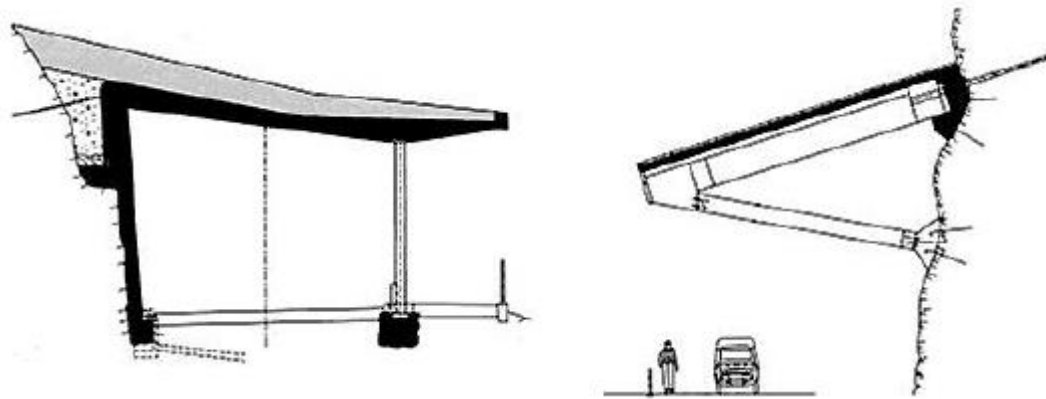


Figura 39 - Esquema de dois abrigos contra queda de blocos: túnel falso (esquerda) e abrigo encastrado (direita) (adaptado de Wyllie, 2015)

Os abrigos encastrados têm a desvantagem de ter um custo superior, pois necessitam de ancoragens com capacidade superior e o maciço onde são instaladas tem de ser bastante resistente para ter capacidade de redistribuir as forças que lhe são transmitidas, logo não pode estar muito fragmentado. Porém, o seu custo é atenuado pois não são usadas colunas nem fundações do lado oposto ao talude (Figura 40).



Figura 40 - Exemplo de um abrigo encastrado (Wyllie, 2015)

A parte superior dos abrigos é aproximadamente horizontal, com uma pequena inclinação para permitir que haja drenagem. De notar que no abrigo encastrado representado na Figura 40 a inclinação é ascendente, logo este abrigo tem a função de reter os blocos e não de os redirecionar para outro local. Nos abrigos em taludes muito íngremes, o movimento dos blocos será maioritariamente de queda livre, o que resulta num impacto direto dos blocos, num ângulo de quase 90°, então o abrigo terá de absorver toda a energia do impacto, ou seja, terá de ser mais resistente. Para taludes com menor inclinação, os blocos têm tendência a rolar ao longo do abrigo, o que resulta numa menor quantidade de energia a ser absorvida pela estrutura. Se for possível construir um abrigo com a mesma inclinação do talude, a estrutura poderá ser menos resistente porque terá de absorver uma pequena parte da energia dos blocos.

Os túneis falsos, ou *rock sheds*, são aplicados quando é necessária uma solução segura e confiável, em zonas onde existem autoestradas com trânsito intenso ou comboios a alta velocidade e há grande

probabilidade de desprendimento de blocos. São as estruturas que conseguem aguentar mais energia de impacto, comparativamente às soluções mais usuais, como as barreiras e as redes metálicas. Este tipo de solução é vantajoso nos casos em que os blocos são de grande volume e caem de alturas elevadas, o que iria exigir a construção de estruturas muito resistentes. Os abrigos de queda de blocos são igualmente úteis quando a manutenção ou remoção periódica dos blocos é difícil de realizar, e também nos casos em que o maciço está de tal modo fraturado que a materialização de ancoragens estáveis é muito difícil ou mesmo impossível. A sua principal desvantagem é o custo elevado de construção, devido às vigas e lajes de betão armado serem pré-fabricadas, pois a obra tem de ser feita no menor tempo possível, visto que estas estruturas são construídas normalmente em vias com bastante tráfego, logo não pode ser cortada a circulação durante longos períodos. Outro motivo que requer uma duração de execução da obra reduzida e o consequente uso de elementos pré-fabricados é o facto de os trabalhadores estarem expostos ao perigo do desprendimento de blocos durante a construção do abrigo. Para conseguir aguentar as cargas permanentes e variáveis da estrutura, a fundação terá de ser bastante resistente, especialmente do lado junto à encosta, e construída em rocha, o que aumenta também o seu custo. Os abrigos podem ser também construídos em aço, o que lhes fornece uma maior capacidade de absorção de energia devido à maior flexibilidade que têm em relação ao betão, mas não são muito usados porque implicam maiores custos de manutenção e têm um menor tempo de vida útil.

Outro tipo de abrigo para a via consiste numa barreira, semelhantes às barreiras flexíveis referidas previamente, sendo esta instalada na horizontal ou inclinada na direção da face do talude, como um toldo ou cobertura (Figura 41). Os blocos são expulsos para fora da rede para uma zona segura, o que lhe confere uma capacidade de autolimpeza, uma vez que os blocos não ficam acumulados atrás da barreira e não é preciso retirá-los.



Figura 41 - Exemplo de uma cobertura contra queda de blocos (Geobrugg, 2018)

Estas coberturas funcionam de maneira a que apenas uma porção da energia seja absorvida pela estrutura, conduzindo os blocos por cima da via para uma zona própria para o efeito, ao contrário das barreiras flexíveis, que são construídas de maneira a interromper a trajetória dos blocos. A diminuição da velocidade dos blocos depende do ângulo em que estes chocam com a estrutura; se o bloco cair verticalmente, o que é típico em taludes muito inclinados, e a barreira estiver instalada horizontalmente, esta vai absorver toda a energia do impacto. É então preferível que a barreira esteja instalada numa

inclinação aproximada à do talude, de modo a absorver uma menor porção da energia. Deste modo, considerando a flexibilidade da barreira, pode ser construída uma estrutura mais leve e menos resistente. As coberturas têm a vantagem de não necessitar de fundações, como no caso dos abrigos encastrados. São usados perfis metálicos para sustentar as redes. Para restringir o movimento vertical dos perfis são usados cabos de aço ancorados ao maciço do lado de fora da estrada (Figura 41).

4.6. AVALIAÇÃO DO RISCO DO DESPRENDIMENTO DE BLOCOS

As vias de comunicação são afetadas pelo perigo devido a riscos naturais relacionados com as condições geológicas dos terrenos por onde passam. O desprendimento de blocos é um dos riscos naturais a que estas infraestruturas estão sujeitas. A construção de um sistema de estradas seguro para a população é bastante difícil de executar, especialmente quando as estradas passam por zonas montanhosas que originam desastres naturais. Por esta razão, foi desenvolvido, em 1991 (Pierson e Van Vickle), o *Rockfall Hazard Rating System*, um sistema de avaliação do risco da queda de blocos. Este método de avaliação do risco tem como objetivo possibilitar que o problema do desprendimento de blocos seja tratado de maneira a evitar e prever a sua ocorrência, tomando medidas de proteção, em vez de reparar os danos que possam ser causados.

A avaliação do risco em obras como autoestradas ou caminhos de ferro constitui um desafio importante devido à amplitude deste tipo de obras, que torna difícil obter informação suficiente para realizar estudos de estabilidade da totalidade dos taludes e encostas ao longo do percurso das vias. Sendo assim, com exceção das zonas que são efetivamente consideradas críticas devido à prévia ocorrência de desprendimentos, grande parte das encostas ao longo da via não serão devidamente avaliadas. Este sistema de avaliação do risco propõe então um método para identificar os taludes com risco de desprendimento e que trabalhos são necessários realizar com maior urgência para corrigir ou reduzir de forma eficiente estes perigos.

O método estabelece certas categorias que são avaliadas e cada uma associada a um valor; a soma destes valores corresponde a uma pontuação que permite classificar um talude em relação ao seu risco. As categorias consideradas na avaliação do risco são as seguintes:

Altura do talude - esta altura é medida deste o pé do talude até ao ponto mais alto onde é esperado que haja desprendimento. Blocos em taludes mais altos têm maior energia potencial do que em taludes mais baixos, ou seja, representam um maior perigo, logo terão um peso mais elevado.

Eficiência da valeta - este parâmetro avalia a capacidade da valeta ou da berma de impedir que os blocos cheguem à estrada. Depende da altura e inclinação do talude, da largura e profundidade da valeta ou berma, das dimensões e quantidade expectáveis dos blocos e do efeito das irregularidades do terreno.

Risco médio por veículo - esta categoria corresponde à percentagem de tempo que um veículo permanece na zona de risco da queda de blocos. A percentagem é calculada em função da intensidade média diária do trânsito, do comprimento da zona de risco e do limite de velocidade estabelecido.

Distância de visibilidade - é a distância a um objeto na estrada necessária para que o condutor reaja à situação. É influenciada pelo traçado da estrada, ou seja, existência de curvas, horizontais ou verticais, que dificultam a visão ao condutor. Este parâmetro é exprimido em percentagem, que é calculada através do quociente entre a distância de visibilidade real e a do condutor.

Largura da via - é medida de uma berma da estrada à outra, e representa o espaço disponível para serem realizadas manobras de modo a evitar chocar com o bloco que se desprendeu.

Características geológicas - esta categoria é dividida em dois casos: no caso 1, o principal fator que leva ao desprendimento de blocos são as descontinuidades (falha, superfície de estratificação, diáclase), enquanto que no caso 2, o desprendimento é devido principalmente à erosão e meteorização do maciço.

Tamanho do bloco ou volume de material desprendido - tal como no caso anterior, esta categoria é separada em duas opções: na primeira é considerado o tamanho dos blocos e na segunda o volume, dependendo do tipo de desprendimento. Se os blocos isolados são os elementos típicos do desprendimento, então deve ser considerado o tamanho do bloco; se o que caracteriza o desprendimento é a quantidade de blocos de vários tamanhos, deve considerar-se o volume como elemento mais importante.

Clima e presença de água - a água e os ciclos gelo-degelo contribuem para o desgaste e movimento de material rochoso. Deve ser considerado se há fluxos contínuos ou intermitentes de água, fazendo uma análise da quantidade de precipitação anual e a possibilidade de a mesma congelar durante um período do ano.

Historial de queda de blocos - nesta categoria são analisados registo de queda de blocos (se existir) ao longo dos anos, no talude em questão. A frequência, a quantidade, em que condições climáticas ocorreram e os danos provocados são dados importantes a obter.

Com base na pontuação do talude, este pode ser avaliado para determinar a urgência de intervenção e que medidas deverão ser tomadas para prevenir a queda de blocos. Por exemplo, se uma encosta com risco de desprendimento tiver um peso elevado na cotação da eficiência da valeta ou berma, uma medida simples e eficiente seria a construção de uma vala ou o alargamento da berma. Sabendo o peso de cada categoria é possível criar um programa de implementação de medidas de proteção de forma económica e eficaz.

5

SOFTWARE DE SIMULAÇÃO DA QUEDA DE BLOCOS

5.1. INTRODUÇÃO

A previsão do desprendimento de blocos é bastante complexa, como se concluiu no capítulo anterior. A estimação correta de parâmetros tais como a trajetória, velocidade ou energia dos blocos é impossível de obter. Portanto, todas as simulações e estimativas em relação a este tipo de instabilidade são apenas aproximações.

Quando uma observação do terreno não é suficiente para estimar as possíveis trajetórias dos blocos, devido à inexistência de antecedentes conhecidos ou de uma morfologia completa do maciço, deve-se fazer um estudo do talude, para determinar a extensão das trajetórias (ponto de desprendimento e local onde os blocos se imobilizaram), as alturas de ressalto, a velocidade e a energia atingida pelos blocos. Para isso é preciso conhecer o tamanho dos blocos, a rugosidade, ângulo de atrito, e coeficientes característicos do material rochoso. As trajetórias podem então ser simuladas com recurso a programas informáticos.

O programa utilizado na presente dissertação é o *RocFall* (versão 6.0) da *Rocscience*, um programa de análise estatística concebido com o propósito de efetuar a análise de taludes com risco de queda de blocos. Este programa simula um conjunto de trajetórias possíveis para um dado número de blocos que caem ao longo de um talude, podendo também simular-se a colocação de barreiras dinâmicas, definindo a sua altura e capacidade energética necessária para impedir a passagem dos blocos. Através da introdução das características do terreno e da simulação da queda de blocos, o programa calcula as distribuições de energia, velocidade e altura de ressalto dos blocos ao longo do perfil do talude, representando-as graficamente. Este *software* permite também a implementação de medidas corretivas: as propriedades do material em cada segmento do talude podem ser alteradas, proporcionando uma modelação do talude com grande precisão. Através das distribuições da energia cinética e da altura de ressalto dos blocos é possível determinar a capacidade e altura das barreiras, assim como a sua localização no talude.

O *software RocFall* utiliza dois métodos de análise: *Lumped mass* ou *Rigid body*. O método *Lumped mass*, ou modelo da massa concentrada, considera que cada bloco tem toda a sua massa concentrada num só ponto e que não tem volume; neste caso, para calcular a energia cinética apenas é necessário ter em conta a massa do bloco. Este método usa uma análise baseada em três algoritmos: o algoritmo de partículas, o algoritmo do projétil e o algoritmo de deslizamento. Estes algoritmos permitem uma simulação correta das condições iniciais e do movimento do bloco quando está no ar e quando está em contacto com o talude (*Rocscience*, 2018). O modelo *Rigid body*, ou modelo do corpo rígido, contabiliza o volume dos blocos, que podem assumir a forma de diversos polígonos, e possibilita a simulação dos

diferentes tipos de movimento dos blocos. Tem um maior nível de precisão, mas a sua aplicação é mais difícil devido à informação de base que requer.

A análise da queda de blocos no programa é baseada no método de simulação Monte Carlo, que usa sequências de números aleatórios para obter resultados numéricos, fazendo várias simulações um elevado número de vezes. O funcionamento do método assemelha-se a um lançamento de dados para cada um dos parâmetros utilizados pelo programa nessa análise, de modo a considerar a variação dos seus valores. As sequências de números podem ser de dois tipos: aleatórias ou pseudoaleatórias. No caso de a sequência ser aleatória, o conjunto dos valores é sempre diferente, logo os resultados da análise serão também sempre diferentes em cada simulação. No caso da sequência pseudoaleatória, os resultados da análise serão sempre os mesmos para cada vez que o programa é corrido pois a sequência de números é sempre a mesma. A finalidade da opção pseudoaleatória é permitir que os resultados da análise sejam fáceis de reproduzir, mesmo que para gerar alguns dos dados de entrada do programa sejam utilizados números aleatórios.

5.2. PARÂMETROS CONSIDERADOS NA SIMULAÇÃO DA QUEDA DE BLOCOS

Prever a trajetória de um bloco que se desprende do talude rochoso é de extrema importância, pois permite saber o alcance que terão os blocos, e se há risco de atingirem zonas habitacionais ou estruturas urbanas. Assim, devem ser conhecidos os parâmetros que influenciam a trajetória dos blocos e que são considerados pelo programa para simular a queda destes fragmentos de rocha ao longo de um talude. O programa permite atribuir a cada parâmetro uma distribuição estatística (normal, uniforme, exponencial, etc) para simular a variação do seu valor.

5.2.1. COEFICIENTE DE RESTITUIÇÃO

O coeficiente de restituição é uma grandeza adimensional que caracteriza a colisão entre dois corpos, e representa a energia que é preservada ou perdida com esse impacto. Define-se pelo quociente das velocidades dos corpos imediatamente antes e depois do choque. Este parâmetro é característico de cada material. Através do valor do coeficiente de restituição é possível avaliar se há conservação de energia, se houve perda, ou se este foi totalmente dissipada. Se o coeficiente de restituição tomar o valor de 1, então não há dissipação de energia - a energia cinética antes do choque é elasticamente restituída e os corpos mantêm a energia e velocidade após a colisão - o choque diz-se elástico; se houver perda parcial de energia, trata-se de um choque parcialmente elástico, e o coeficiente tem um valor entre 0 e 1; se o coeficiente for 0, toda a energia foi perdida na colisão - a velocidade imediatamente após o choque é nula - e o choque é inelástico. Em casos reais, os materiais têm sempre um valor deste coeficiente entre 0 e 1, pois há sempre dissipação de energia através do calor, do atrito, do som, etc. Este coeficiente tem em conta todas as características do impacto: deformação, deslizamento no ponto de contacto, movimentos translacionais e rotacionais (Asteriou, Saroglou e Tsiambaos, 2012).

Na física, o estudo do choque entre dois corpos é normalmente aplicado à situação entre dois corpos de massas e materiais distintos com movimento translacional e rotacional. No caso da queda de blocos em vertentes de formações rochosas esta noção é aplicada à situação em que os blocos que se desprendem chocam com a face do talude. Este caso é mais simples pois um dos corpos (talude) tem velocidade nula e massa infinita (Wyllie, 2015). Quanto maior o valor do coeficiente de restituição, menor é a energia que se perde no impacto. Deste modo, quanto maior for o coeficiente do material rochoso, menor será a energia que os blocos perdem ao embater na face do talude. Se o coeficiente for reduzido, uma fração significativa da energia será dissipada no momento do impacto, atenuando assim a força dos blocos. Por

outro lado, se o coeficiente tiver um valor elevado, os blocos terão tendência a saltar e a atingir maiores níveis de energia, levando a uma situação mais desfavorável. O coeficiente de restituição tem, portanto, uma grande influência na trajetória dos blocos.

O coeficiente de restituição é decomposto em duas componentes segundo as direções tangencial e normal à superfície de impacto. O coeficiente de restituição normal, R_n , é, portanto, calculado através do quociente entre a velocidade normal imediatamente depois e antes do impacto. Do mesmo modo, a componente tangencial deste coeficiente, R_t , caracteriza-se pelo quociente entre a velocidade tangencial imediatamente depois e antes do choque. A componente tangencial resulta do atrito da superfície de contacto entre o bloco de rocha e o talude, e representa a percentagem da componente da velocidade tangencial (paralela ao talude) que é perdida com o choque. O coeficiente de restituição tangencial depende da extensão do deslizamento e rolamento do bloco durante o choque e dos efeitos do atrito nos momentos de contacto com o talude. A vegetação, mesmo em menor grau, tem influência no coeficiente de restituição tangencial. Geralmente o coeficiente de restituição tangencial é igual ou maior do que o normal. Isto deve-se ao facto de, quando um corpo em movimento choca contra um corpo parado, tem tendência a perder mais energia na componente normal do que na tangencial à trajetória do movimento. Logo, quando o bloco que se desprende embate no talude e ressalta, não atinge a mesma altura máxima que atingiu antes do impacto, pois perdeu velocidade e energia na direção normal ao movimento. Porém, a mesma perda não se verifica na direção tangente ao movimento, pois o bloco continua a percorrer a superfície do talude (a não ser que encontre um obstáculo); ou seja, também perde energia mas essa perda é pequena em comparação à perda de energia na componente normal. O coeficiente de restituição normal é uma medida de comparação da mudança da velocidade normal antes do impacto com a velocidade normal após o impacto, que varia com a rigidez da superfície do talude (Luis Fonseca, 2010).

A determinação do coeficiente de restituição pode ser feita através da análise ao terreno depois de ocorrer queda de blocos (retroanálise), através de testes laboratoriais ou realizando testes *in situ*, que consistem no lançamento de blocos em taludes de características conhecidas, e na posterior medição das velocidades imediatamente antes e após o choque (Asteriou, Saroglou e Tsiambaos, 2012).

A retroanálise é feita depois de ocorrer queda de blocos examinando as marcas deixadas no terreno ou nas árvores e o local onde os blocos foram imobilizados. Sendo a queda de blocos um fenómeno bastante difícil de prever, esta análise permite recolher informação acerca dos próprios blocos (tamanho, forma, etc.) e também da altura de ressalto e distância percorrida pelos mesmos. É neste tipo de observações que se baseiam os valores de algumas das grandezas que influenciam o mecanismo de instabilidade da queda de blocos, muitas vezes devido à sua difícil obtenção ou cálculo, pelo que apenas se pode fazer uma estimativa.

No programa *RocFall*, apenas o talude tem coeficiente de restituição; para os blocos esta propriedade não é considerada.

O Quadro 4 apresenta alguns valores do coeficiente de restituição normal e tangencial dependendo do tipo de material do talude.

Quadro 4 - Valores dos coeficientes de restituição normal e tangencial para diferentes tipos de talude (Luis Fonseca, 2010)

Descrição do talude	Coeficiente de restituição	
	Normal	Tangencial
Rocha firme	0.37 - 0.50	0.87 - 0.95
Rocha firme coberta de grandes blocos	0.33 - 0.37	0.83 - 0.87
Camada de rochas formada por elementos uniformemente distribuídos	0.30 - 0.33	0.68 - 0.75
Solo coberto por vegetação	0.25 - 0.30	0.50 - 0.60

O site da *Rocscience* também fornece uma tabela com valores do coeficiente de restituição, não só para maciços rochosos e terrosos, mas também para outros materiais, tais como betão projetado e asfalto, que se apresenta na Figura 42.

Rocscience Coefficient of Restitution Table

RN (Normal)			RT (Tangential)			Type
Min	Max	Mean	Min	Max	Mean	
0.370	0.420		0.870	0.920		Hard surface paving
0.330	0.370		0.830	0.870		Bedrock or boulders with little soil or vegetation
0.280	0.320		0.800	0.830		Soft soil slope with little vegetation
		0.393			0.567	Soil
		0.453			0.737	Shotcrete
		0.487			0.910	Rock slope
		0.500			0.950	Bedrock
		0.350			0.850	Bedrock covered by large blocks
		0.300			0.700	Debris formed by uniform distributed elements
		0.250			0.550	Soil covered by vegetation
		0.530			0.990	Clean hard bedrock
		0.400			0.900	Asphalt roadway
		0.350			0.850	Bedrock outcrops with hard surface large boulders

Figura 42 - Valores dos coeficientes de restituição normal e tangencial para diferentes tipos de talude (adaptado de *Rocscience*, 2018)

Este parâmetro é considerado do mesmo modo em ambos os métodos de análise, através da componente normal e tangencial do coeficiente.

5.2.2. ÂNGULO DE ATRITO

O ângulo de atrito é uma característica de resistência dos maciços que representa a capacidade de um maciço de suportar uma determinada tensão de corte, e que deriva do critério de cedência de Mohr-Coulomb:

$$\tau = \sigma' \cdot \tan(\varphi') + c' \quad (3)$$

O ângulo de atrito dos maciços rochosos pode ser determinado através do ensaio de compressão triaxial, que consiste em levar uma amostra à rotura, colocando-a numa câmara de ensaio e submetendo-a a um estado de tensões e um carregamento axial (Matos Fernandes, 2006), ou através de ensaios de deslizamento.

Na simulação do movimento dos blocos, se um segmento do talude tiver maior inclinação do que o ângulo de atrito, os blocos têm um movimento descendente; se a inclinação for menor, os blocos vão perdendo velocidade até se imobilizarem.

No programa *RocFall*, o método de análise da massa concentrada oferece três opções para a escolha do ângulo de atrito: pode ser definido um valor pelo utilizador, ou calculado a partir do coeficiente de restituição tangencial, ou tomar o valor de zero. Neste último caso, o bloco tem sempre tendência a rolar, pois a resistência ao movimento é nula.

No modelo do corpo rígido, o atrito é considerado através do coeficiente de atrito dinâmico, obtido através do ângulo de atrito. O coeficiente de atrito é uma grandeza adimensional que relaciona a força de atrito e a força de compressão entre dois corpos; o seu valor é mais elevado quanto maior for o atrito entre os dois corpos. O coeficiente de atrito pode ser estático ou dinâmico; neste caso, trata-se do coeficiente de atrito dinâmico pois as superfícies em contato apresentam movimento relativo (Sheppard e Tongue, 2005).

O coeficiente de atrito dinâmico é calculado a partir do ângulo de atrito:

$$\text{coeficiente de atrito dinâmico} = \tan(\phi) \quad (4)$$

5.2.3. RUGOSIDADE

A rugosidade é um parâmetro que influencia a trajetória dos blocos, pois tem em conta as pequenas inclinações e irregularidades da face do talude. No caso de taludes naturais, que possuem uma rugosidade elevada, a queda de blocos é um fenómeno mais complexo, pois devido a todos os desníveis do terreno os blocos vão ter diferentes tipos de movimento. Se os blocos caíssem ao longo de uma superfície lisa sem qualquer irregularidade, iriam simplesmente deslizar ou rolar. É de fácil compreensão o facto de que os blocos irão saltar mais com o aumento da rugosidade do talude.

No modelo da massa concentrada a rugosidade toma o valor da inclinação de cada segmento do talude, pelo que não foi atribuída nenhuma distribuição estatística a este parâmetro. No modelo *Rigid body*, a rugosidade pode ou não ser considerada. É definida pelo espaçamento e amplitude, sendo o espaçamento a distância entre amplitudes e a amplitude a distância vertical até ao pico da onda de rugosidade, medida desde a superfície plana do talude.

5.2.4. MASSA E DENSIDADE DOS BLOCOS

A massa e a densidade dos blocos são parâmetros utilizados pelo programa para determinar o seu volume e, juntamente com as velocidades calculadas, as energias atingidas pelos blocos ao longo do talude; estes parâmetros são considerados nos dois métodos de análise.

Na simulação da trajetória dos blocos, o programa assume que a massa dos blocos se mantém constante durante a queda. Mas na realidade os blocos fragmentam-se de um certo modo nos pontos de colisão com o terreno, o que significa que a massa do bloco no final da queda será menor do que a massa no local de origem dos blocos. Isto deve-se ao facto de os blocos conterem superfícies de fraqueza que provocam a quebra ao longo dos mesmos nos momentos de impacto. A fragmentação dos blocos pode ocorrer também devido à sua forma irregular, pois as suas saliências vão sendo partidas até ao ponto em que o bloco atinge uma forma aproximadamente esférica ou elipsoidal; esta geometria do bloco faz com que este tenha maior tendência a rolar do que se tivesse uma forma mais alongada (Wyllie e Mah, 2004). Este aspeto não é devidamente simulado no programa *RocFall*; no entanto, sendo a situação mais desfavorável a de um bloco que mantém a sua massa constante durante a totalidade da trajetória, então o dimensionamento é feito do lado da segurança.

A massa dos blocos pode variar entre alguns quilos até várias toneladas, dependendo das descontinuidades do maciço e dos blocos formados.

No Quadro 5 são apresentados alguns valores da densidade de diferentes rochas.

Quadro 5 - Valores da densidade de diferentes rochas

Rocha	Densidade (kN/m ³)
Granito	26.0
Basalto	27.1
Gesso	22.5
Calcário denso	20.9
Xisto argiloso	25.7
Mármore	27.0

5.2.5. TAMANHO E FORMA DOS BLOCOS

Segundo Luis Fonseca (2010), o tamanho dos blocos que caem ao longo da encosta depende do seu tamanho no local de origem, ou seja, no maciço (antes de se desprenderem) e do seu comportamento durante o desprendimento. Podem formar-se blocos de diversos tamanhos, e os blocos podem também mudar de tamanho, devido à fragmentação que se sofrem durante a queda; o pior caso seria aquele em que um bloco de grandes dimensões cai ao longo de toda a encosta. Quando existem blocos de grande volume no ponto final da trajetória que não se fragmentaram muito desde o momento inicial do desprendimento, é mais simples a determinação do tamanho; se não existirem fragmentos de rocha no fim da trajetória, então o tamanho dos blocos deve ser estimado no local de origem.

Como esperado do ponto de vista físico, o tamanho dos blocos influencia o comportamento da queda de blocos de três maneiras: mantendo uma distância entre a superfície do talude e o centro de gravidade do bloco, o que faz com que o bloco atinja zonas mais afastadas do pé do talude; fornecendo um aumento

da energia cinética devido à energia rotacional; e finalmente, ao fornecer um mecanismo de atrito que irá influenciar diretamente a energia cinética rotacional (Vijayakumar et al., 2012).

O tamanho dos blocos é considerado no programa através da sua massa e densidade.

Outro aspeto que é também relevante abordar é a forma dos blocos, pois vai também influenciar o movimento dos mesmos. Blocos angulares têm mais tendência a saltar do que blocos esféricos, que tendem a rolar. Normalmente, nas simulações assume-se a forma esférica devido ao facto de ser a que produz maior momento de inércia, logo corresponde ao caso mais desfavorável. A opção para escolher diferentes formas de blocos é disponível apenas no método de análise do corpo rígido.

5.3. PARTICULARIDADES DO MÉTODO DE ANÁLISE *RIGID BODY*

O método *Rigid body* permite introduzir outros parâmetros que não são contabilizados no método *Lumped mass*, nomeadamente o coeficiente de atrito dinâmico (ver 5.2.2.), a resistência ao rolamento (*rolling friction*) e o amortecimento florestal (*forest damping*), sendo usadas as duas primeiras grandezas para considerar o efeito do atrito.

A resistência ao rolamento é a força que resiste ao movimento de um corpo que tende a rolar ao longo de superfície. Representa a perda de energia devido a fatores não relacionados com o coeficiente de atrito dinâmico, como deformações plásticas ou deslizamento da superfície de contacto (*Rocscience*, 2018).

Na Figura 43 são apresentados alguns valores do coeficiente da resistência ao rolamento.

Rolling Friction Coefficient	Type
0.4	rock (limestone)
0.55	hard debris (earth and angular rock fragments with some boulders, compacted)
0.75	soft debris (angular rock fragments and earth with some boulders, loose)
0.6	medium debris (medium debris covering smooth rock, compacted)
0.70-1.00	medium angular debris with scattered trees
0.55-0.65	earth with grass and some vegetation
0.85	ditch with mud
0.40-0.45	road

Figura 43 - Valores do coeficiente da resistência ao rolamento para diferentes tipos de talude (adaptado de Rocscience, 2018)

O amortecimento florestal permite ter em conta a existência de plantas ou árvores na encosta. Se o talude estiver revestido por extensa vegetação, o choque dos blocos contra árvores ou plantas pode diminuir a sua velocidade e consequentemente a energia cinética. Esta opção oferece a possibilidade de estabelecer valores para a altura efetiva das árvores e densidade média da floresta para cada segmento do talude.

No caso em análise nesta dissertação, não existem árvores ou plantas com dimensões suficientes para afetar significativamente o percurso dos blocos ao longo da encosta, apenas alguma vegetação que pode ter uma pequena influência na trajetória dos blocos (que foi considerada através do coeficiente de restituição), pelo que a opção amortecimento florestal do *software RocFall* não foi aplicada.

5.4. DIMENSIONAMENTO DE BARREIRAS FLEXÍVEIS

Existem dois aspetos a considerar na colocação de uma barreira: o dimensionamento e a sua localização no talude. O dimensionamento consiste em definir a altura e capacidade da barreira. Para isso, é imprescindível conhecer a altura do ressalto e a energia dos blocos em queda. Uma barreira deve ter altura suficiente para travar os blocos que possam cair pela encosta e capacidade para aguentar a energia com que os blocos a atingem. Assim, deve-se primeiro calcular a altura máxima que os blocos podem atingir em relação à face do talude - altura de ressalto - e a energia cinética máxima que adquirem.

5.4.1. ALTURA DE RESSALTO

A altura de ressalto máxima é alcançada, evidentemente, quando o bloco se encontra em movimento de salto; ao embater nas saliências do terreno, visto que taludes naturais são normalmente muito acidentados, o bloco irá saltar e alcançar alturas elevadas. Esta altura pode ser estimada através do conhecimento das propriedades do talude e dos blocos no momento do choque. Assuma-se um bloco que se desprende de um talude rochoso, acabando por cair, e que desce a encosta em movimento de salto; analisando um determinado momento de choque com o talude, para calcular a altura do ressalto é necessário saber a velocidade depois do choque, que depende da velocidade antes do choque e do coeficiente de restituição, como já foi explicado anteriormente. Para simular este movimento do bloco no programa, é preciso, portanto, fornecer um valor para o coeficiente de restituição. Conhecendo as alturas de ressalto, pode-se dimensionar a altura da barreira, que deve ser superior à altura atingida pelos blocos, caso seja possível.

5.4.2. ENERGIA CINÉTICA

Segundo Luis Fonseca (2010), na análise da energia cinética em casos de desprendimento de blocos, estes são tratados como corpos rígidos que se encontram em movimento. Qualquer deslocamento de um corpo rígido pode ser representado por uma translação e uma rotação. Segundo este princípio, o processo do desprendimento de blocos é composto por duas componentes: o movimento de translação e o de rotação. Estes parâmetros podem ser quantificados, tanto como energia em movimento como energia cinética. O cálculo destas energias cinéticas baseia-se na suposição de que a massa dos blocos gira em torno do centro do corpo. Por isso, o movimento dos blocos é a soma das energias cinéticas de translação e de rotação.

A energia cinética dos blocos em queda tem duas componentes: translacional e rotacional. A primeira é produzida devido ao movimento de translação, que neste caso é o movimento do bloco ao cair pela encosta. A componente rotacional da energia cinética é devida ao movimento de rotação do corpo, que se gera quando o bloco tem movimento de rolamento, aumentando assim a energia cinética total.

No caso da energia cinética de translação atingida pelos blocos, esta depende da sua massa e velocidade.

$$E_{c_{translação}} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 \quad (5)$$

Conclui-se, portanto, que quanto maior for a massa do bloco maior será a energia cinética, e o mesmo se aplica para a velocidade.

No caso da energia cinética de rotação, esta é dada pelo momento de inércia e pela velocidade angular (velocidade de rotação).

$$E_{c_{rotação}} = \frac{1}{2} \cdot I \cdot \omega^2 \quad (6)$$

O momento de inércia do corpo, por sua vez, depende da massa e do raio. A velocidade rotacional é obtida através do quociente entre a velocidade de translação e o raio. A rotação dos blocos ocorre devido ao momento gerado pela velocidade tangencial e pelo atrito entre o bloco e a superfície do talude. Segundo Wyllie (2015), esta rotação tem um efeito “atenuador” na trajetória do bloco, fazendo com que o bloco não salte tanto quanto um bloco sem movimento de rotação.

Tal como foi referido no início do capítulo, o método de análise *Lumped mass* não considera que o bloco tem volume, apenas massa. Contudo, o programa assume, apenas para a determinação da energia cinética rotacional, que o corpo tem a forma de uma esfera, pois se o bloco fosse uma partícula infinitamente pequena, não poderia rolar. É então calculado o raio com base nos valores da massa e da densidade dos blocos; a partir destas duas grandezas o programa consegue obter o volume do bloco e, consequentemente, o raio (Wyllie, 2015).

No modelo do corpo rígido o volume do bloco é sempre contabilizado, logo não há uma abordagem diferente para o cálculo da energia cinética de rotação.

Para fazer a escolha das barreiras dinâmicas a instalar é necessário conhecer as barreiras disponíveis pelas empresas que as fabricam. Na Figura 44 apresentam-se algumas das barreiras comercializadas pela empresa Geobrugg.

Sistemas de barreras con capacidad de absorción de energía de 100 kJ à 5000 kJ



Tipo	TXI-010	AXI-025	AXI-050	RXI-025	RXI-050	RXI-100	RXI-150	RXI-200	RXI-300	RXI-500
Clase de la energía*	1 (100 kJ)	2 (250 kJ)	3 (500 kJ)	2 (250 kJ)	3 (500 kJ)	5 (1000 kJ)	6 (1500 kJ)	7 (2000 kJ)	8 (3000 kJ)	9 (5000 kJ)
Tipo de red conjunto	TECCO® G80/4	ROCCO® 7/3/350 o 7/3/300	ROCCO® 7/3/350 o 7/3/300	ROCCO® 7/3/350 o 7/3/300	ROCCO® 7/3/350 o 7/3/300	ROCCO® 12/3/350 o 12/3/300	ROCCO® 12/3/350 o 12/3/300	ROCCO® 16/3/350 o 16/3/300	ROCCO® 16/3/350 o 16/3/300	ROCCO® 19/3/300
Alambres Ø	4 mm	3 mm	3 mm	3 mm	3 mm	3 mm	3 mm	3 mm	3 mm	3 mm
Anillo Ø	80 mm	300 / 350 mm	300 / 350 mm	300 / 350 mm	300 / 350 mm	300 / 350 mm	300 / 350 mm	300 / 350 mm	300 / 350 mm	300 mm
Poste tipo mínimo	HEB 140	HEB 160 S355	HEB 200 S 355	HEB 100	HEB 120	HEB 140	HEB 140	HEB 160	HEB 160	HEB 240
Poste tipo máximo	HEB 160	HEB 180 S355	HEB 220 S 355	HEB 140	HEB 140	HEB 200	HEB 200	HEB 220	HEB 240	HEB 300
Distancia entre postes	6 - 12 m	6 - 12 m	6 - 12 m	6 - 12 m	6 - 12 m	6 - 12 m	6 - 12 m	8 - 12 m	8 - 12 m	8 - 12 m
Cables diámetro mínimo	12 mm	12 mm	14 mm	12 mm	14 mm	18 mm	20 mm	22 mm	22 mm	22 mm
Cables diámetro máximo	14 mm	18 mm	20 mm	18 mm	20 mm	22 mm	22 mm	22 mm	22 mm	22 mm
Cables de retención	--	--	--	sí	sí	sí	sí	sí	sí	sí
Por cada 60 metros de barrera: Cantidad de anillos en el cable de soporte	4	8	8	8	8	16	16	32	42	64
Cantidad de anillos en el cable de retención	--	--	--	0	0	0	0	14	56	56
Altura de barrera mínima	2 m	2 m	3 m	2 m	2 m	3 m	3 m	4 m	4 m	5 m
Altura de barrera máxima*	3 m	3 m	4.5 m	4 m	4.5 m	6 m	6 m	7.5 m	7.5 m	9 m
Máxima elongación**	2.15 m	4.05 m	5.07 m	4.05 m	5.07 m	4.6 m	6.3 m	6.7 m	8.78 m	7.8 m
Mínima altura residual efectiva de protección										
en la sección del impacto**	85%	68%	61%	68%	61%	66%	61%	64%	56%	59%
Mínima altura residual efectiva de protección										
en las secciones adyacentes	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
Carga máxima de anclaje lateral**	120 kN	140 kN	170 kN	140 kN	170 kN	230 kN	230 kN	230 kN	280 kN	260 kN
Carga máxima de anclaje al monte**	--	--	--	50 kN	70 kN	140 - 220 kN	220 - 260 kN	250 - 280 kN	250 - 310 kN	280 - 310 kN

Figura 44 - Alguns exemplos de diferentes tipos de barreiras flexíveis disponíveis no mercado (Geobrug, 2018)

O programa *Rocfall* fornece informação sobre algumas barreiras fabricadas por duas empresas: Maccaferri e Trumer Schutzbauten. A Figura 45 mostra um exemplo das características de uma das barreiras da empresa Maccaferri disponíveis com o *software*.

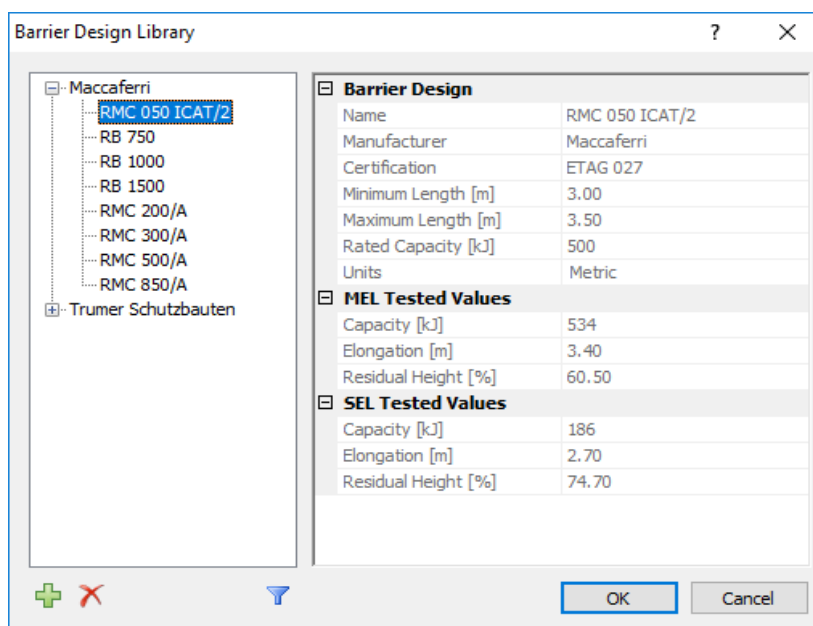


Figura 45 - Diferentes tipos de barreiras flexíveis disponíveis no programa *Rocfall*

As barreiras são ensaiadas de acordo com a norma europeia ETAG 27 (*European Technical Approval Guideline*); nestes ensaios, são testadas as barreiras através de impactos de blocos com determinada energia. O dimensionamento de uma barreira no programa pode ser feito para dois níveis de energia: nível de energia máximo, MEL (*Maximum Energy Level*), que corresponde ao estado limite último, ou para o nível de energia de serviço, SEL (*Service Energy Level*), que corresponde ao estado limite de serviço. Segundo o ETAG 27, a barreira cumpre as condições do nível de energia máximo (MEL) se conseguir deter o bloco lançado e se o mesmo não tocar no terreno até à barreira ter atingido o máximo alongamento durante o ensaio. Em relação ao nível de energia de serviço (SEL), a barreira cumpre as condições necessárias se conseguir deter um primeiro bloco lançado sem ocorrerem danos na estrutura, se a altura residual depois do teste for pelo menos 70% da altura nominal e se o bloco não tocar no terreno até à barreira ter atingido o máximo alongamento. Seguidamente é lançado um segundo bloco, e a barreira passa o teste se conseguir deter também este bloco se o mesmo não tocar no terreno até à barreira ter atingido o máximo alongamento. Na escolha da barreira a colocar, é possível escolher para que nível de energia se pretende dimensionar.

A capacidade da barreira corresponde à energia do choque do bloco que consegue absorver, sendo cumpridas as condições de altura residual e alongamento. O alongamento da barreira consiste na sua deformação máxima quando é submetida ao impacto do bloco. A altura residual é a altura da rede quando sofre impacto do bloco, medida sem que este seja removido.

6

CASO DE ESTUDO

6.1. ENQUADRAMENTO

A barragem de Foz Tua, localizada em Trás-os-Montes, é uma barragem em abóbada de dupla curvatura de betão convencional (Figura 46), destinada ao aproveitamento hidroelétrico do rio Tua, com cerca de 110 m de altura máxima e 275 m de desenvolvimento do coroamento. O maciço rochoso onde se insere é constituído por granito com descontinuidades dos tipos diáclases e falhas, que originam a formação de blocos de grandes dimensões. Superficialmente os blocos do maciço rochoso são pouco alterados. A caracterização geológico-geotécnica foi condicionada pelas difíceis condições de acesso ao local, no entanto foram realizadas trincheiras e galerias de reconhecimento geológico em cada uma das margens. Foram também realizadas algumas sondagens e ensaios *in situ* e laboratoriais, que permitiram a determinação de algumas características físicas e mecânicas do maciço rochoso (EDP, 2018). A Figura 47 mostra o talude em estudo nesta dissertação.



Figura 46 - Barragem de Foz Tua (EDP, 2018)



Figura 47 - Talude em estudo, barragem de Foz Tua (Celso Lima, 2018)

6.2. MODELAÇÃO

A simulação da queda de blocos no programa *Rocfall* é feita de forma bidimensional, ou seja, em duas dimensões. É analisado o perfil do talude e a trajetória dos blocos ao longo do mesmo. Sem conhecimento do histórico da queda de blocos para o talude em estudo, a trajetória dos blocos será então simulada ao longo de um plano perpendicular à face do talude. Este aspeto deve ser tido em conta no dimensionamento das medidas de proteção, pois pode influenciar a eficácia das mesmas. As soluções devem então ser estudadas ao longo da totalidade da largura do talude, porque se os blocos se desviarem da trajetória simulada podem não ser intercetados pelas estruturas próprias para isso. Uma maneira de resolver este problema é analisando as quedas de blocos que ocorreram previamente num talude. Deste modo, é possível criar um perfil quebrado, constituído por segmentos de vários perfis perpendiculares à face do talude, por onde passaram os blocos; para isso, seria necessário obter um modelo tridimensional do terreno.

Análises estatísticas plausíveis de trajetórias de blocos exigem a simulação de milhares de projéteis. Porém, a simulação de milhares de trajetórias de queda de rochas incorporando todos os tipos de movimento possíveis num terreno complexo aumenta consideravelmente o tempo de computação. Por isso, com o objetivo de manter o tempo de computação razoável, a maioria das simulações de desprendimento de blocos são realizadas com recurso ao modelo *Lumped mass*. Porém, este modelo assume que a massa do corpo está concentrada no seu centro de gravidade, o que leva a uma desvantagem, pois a energia rotacional do bloco não é devidamente contabilizada e o rolamento não é simulado de uma forma realista.

Os parâmetros que são definidos inicialmente no programa são a geometria do talude, as características do maciço e características dos blocos. A geometria do talude pode ser desenhada no programa ou importada de um ficheiro *AutoCAD*, como foi o sucedido neste caso de estudo (Figura 48).

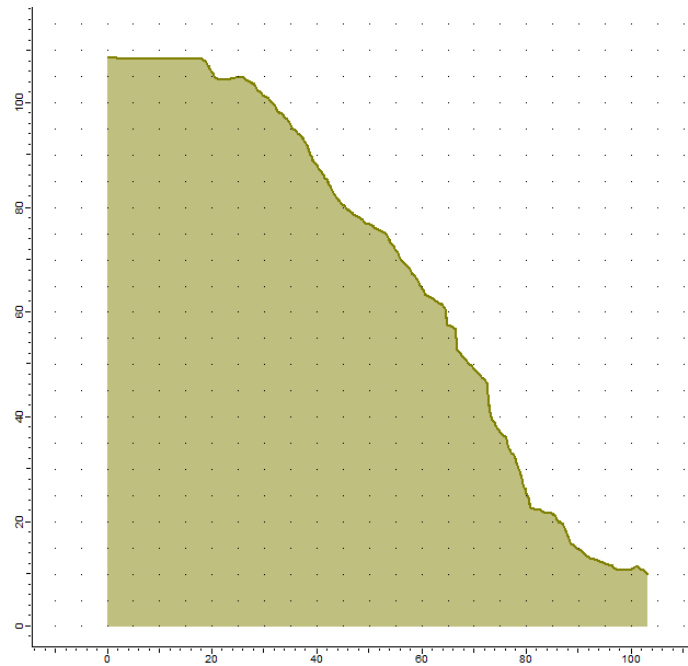


Figura 48 - Perfil transversal ao rio do talude em estudo, no programa *Rocfall*

Depois de definida a geometria são introduzidas as características do material constituinte do talude: coeficiente de restituição, ângulo de atrito e rugosidade (no caso de ser utilizado o método da massa concentrada). Podem também ser definidas zonas distintas no talude com propriedades diferentes. Estando completamente caracterizado o talude, são introduzidas as características dos blocos, definindo os locais onde os blocos se desprendem, que podem ser pontos isolados ou linhas ao longo do perfil longitudinal do talude. No presente caso em estudo foi assumido que os blocos poderiam cair ao longo de toda a encosta, devido ao facto de não ser possível determinar com certeza o ponto ou pontos exatos onde se dão os desprendimentos, e de este ser o caso mais desfavorável. Os dados a introduzir em relação aos blocos são as condições iniciais - velocidade horizontal, vertical e de rotação - e o número de blocos lançados. No caso de os blocos se desprenderem ao longo de uma linha, a sua localização é gerada segundo uma distribuição uniforme, ou seja, a probabilidade de um bloco cair de qualquer ponto ao longo dessa linha é igual. As velocidades iniciais tomaram o valor de zero em todos os casos, correspondendo à situação de desprendimento do maciço rochoso. Em relação às propriedades dos blocos, o programa considera a sua massa e densidade, usadas para calcular a energia cinética dos blocos.

Os valores dos parâmetros atribuídos ao talude e aos blocos para a simulação das trajetórias foram baseados nos dados apresentados no capítulo 5, e são apresentadas no Quadro 6. Os valores do coeficiente de restituição normal e tangencial foram atribuídos com base no tipo de maciço rochoso aparente (rocha firme coberta de grandes blocos) e associados a uma distribuição normal, que o programa assume por defeito. O valor da densidade foi o correspondente ao granito e não lhe foi atribuída qualquer distribuição estatística. Em relação ao ângulo de atrito, os valores obtidos nos ensaios

laboratoriais de desoizamento de sobre diáclases foram à volta de 37° (EDP, 2018). Porém, devido ao facto de as sondagens serem realizadas com o material no interior do maciço, este valor será bastante superior ao valor na superfície do talude. Foi então assumido um ângulo de atrito de 30° nas simulações do programa, sem uma distribuição estatística associada. A massa dos blocos foi inalterada, tomando o valor de 1000 kg que o programa assume por defeito, e sem uma distribuição estatística associada.

Quadro 6 - Propriedades do talude e dos blocos desprendidos introduzidas no programa

Propriedades do talude			Propriedades dos blocos	
coeficiente de restituição		ângulo de atrito (°)	massa (kg)	densidade (kg/m ³)
normal	tangencial			
0.35	0.85	30	1000	2600

Definidas as características do material rochoso e dos blocos desprendidos, é possível correr o programa.

6.2.1. RESULTADOS

6.2.1.1. Trajetória dos blocos

No primeiro caso foi apenas lançado um bloco com as velocidades iniciais nulas, cuja trajetória se representa na Figura 49. O método de análise utilizado nas simulações posteriores foi o da massa concentrada; posteriormente será feita uma análise com o modelo do corpo rígido para avaliar a influência do método de análise nos resultados.

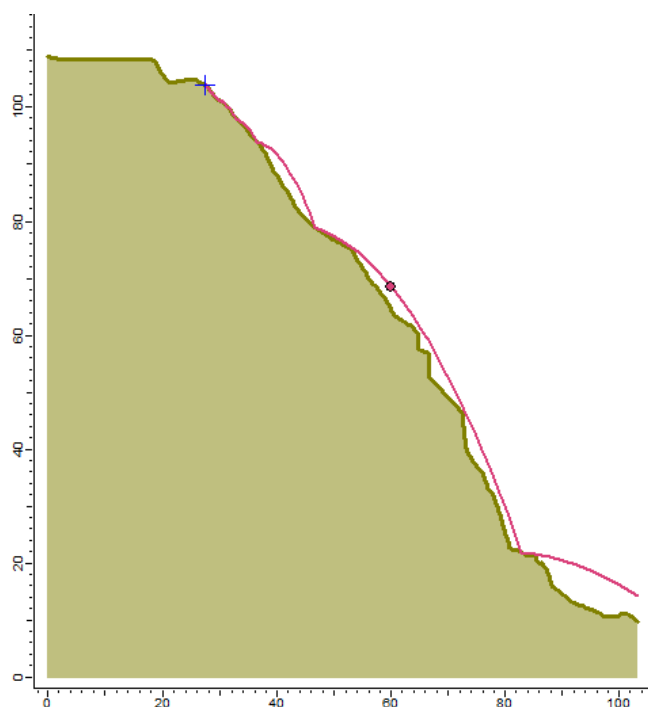


Figura 49 - Resultado da simulação da trajetória de um bloco ao longo do talude em estudo

A partir da imagem é possível analisar a trajetória simulada do bloco: observa-se a influência que as saliências e irregularidades do talude têm na trajetória, e que o bloco aumenta o seu alcance ao longo do percurso. Também se verifica no último choque entre o bloco e o talude que o primeiro não perde muita energia pois ressalta do talude, o que significa que o valor do coeficiente de restituição tangencial (0.85) é bastante elevado, pois na realidade seria provável que o bloco perdesse bastante energia nesse impacto e adquirindo um movimento mais próximo da face do talude.

6.2.1.2. Alturas de ressalto

A Figura 50 representa a altura de ressalto (*bounce height*) ao longo do perfil transversal do talude. A altura de ressalto máxima é de 6.8 metros em relação à face do talude. Tal como no caso anterior, o coeficiente de restituição tem um peso grande na altura ressalto, estando esta diretamente relacionada com a trajetória dos blocos. Como os valores do coeficiente de restituição normal e tangencial são relativamente altos, a altura de ressalto é bastante elevada. A geometria do talude tem também uma grande influência na trajetória, pois o bloco tende a saltar mais devido às protuberâncias do maciço rochoso. Observa-se pelo gráfico que a altura de ressalto desce até zero nos momentos de impacto.

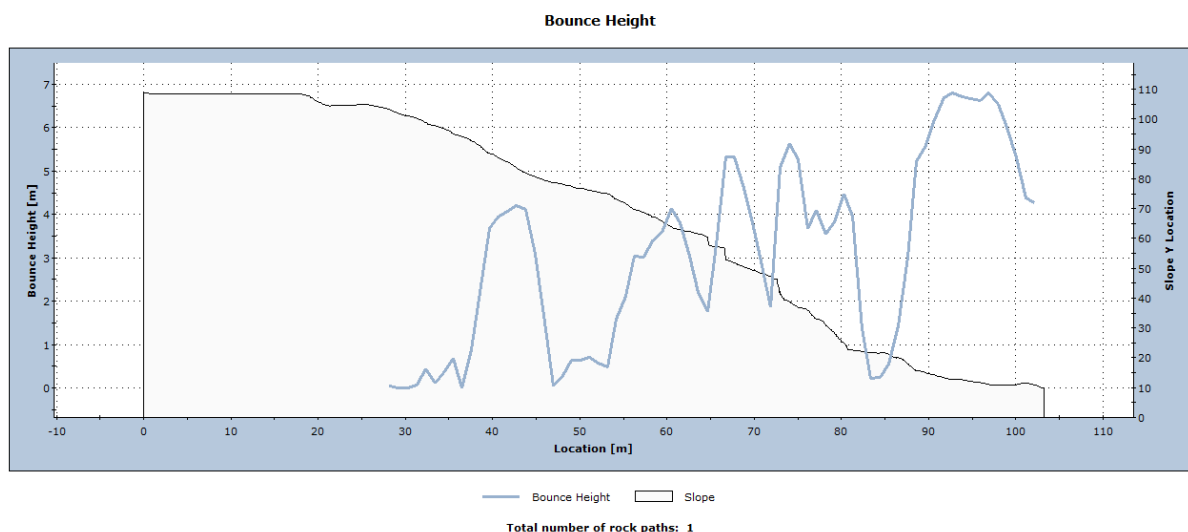


Figura 50 - Alturas de ressalto do bloco desprendido ao longo do perfil transversal do talude em estudo

6.2.1.3. Velocidades

As Figuras 51 e 52 mostram, respetivamente, as velocidades de translação e de rotação do bloco ao longo da sua trajetória.

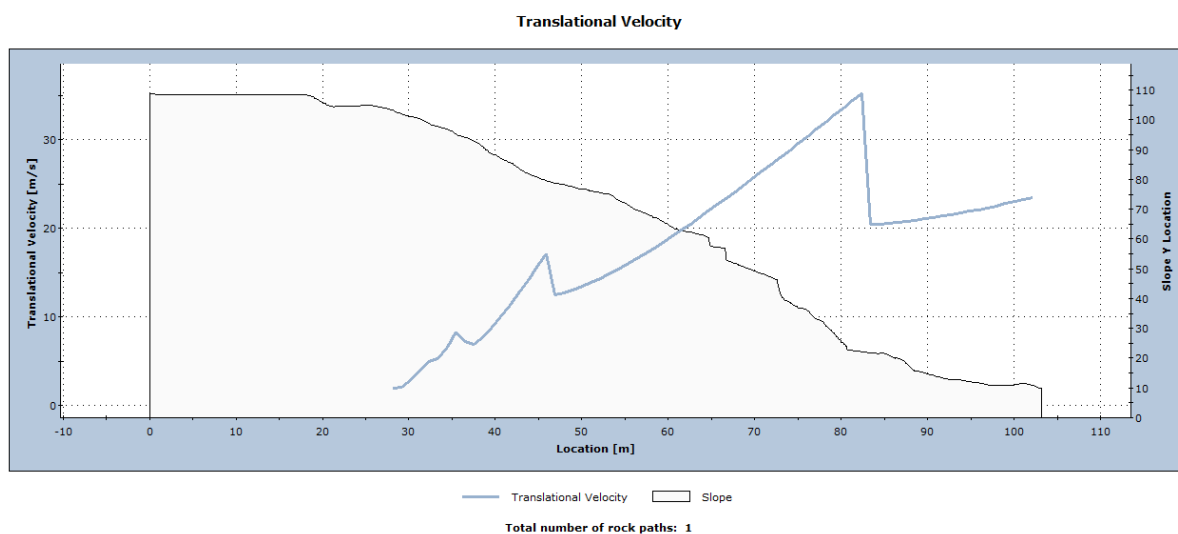


Figura 51 - Velocidades de translação do bloco desprendido ao longo do perfil transversal do talude em estudo

Observa-se que a velocidade de translação aumenta com o movimento do bloco, exceto nos pontos em que o mesmo choca com o talude; nestes pontos verifica-se uma descida instantânea do valor da velocidade, devido à mudança no seu movimento e à perda de energia que sofre. Pelo contrário, na velocidade de rotação acontece o contrário, aumentando substancialmente nos momentos de choque, pois devido ao impacto com o terreno, o bloco adquire movimento de rotação.

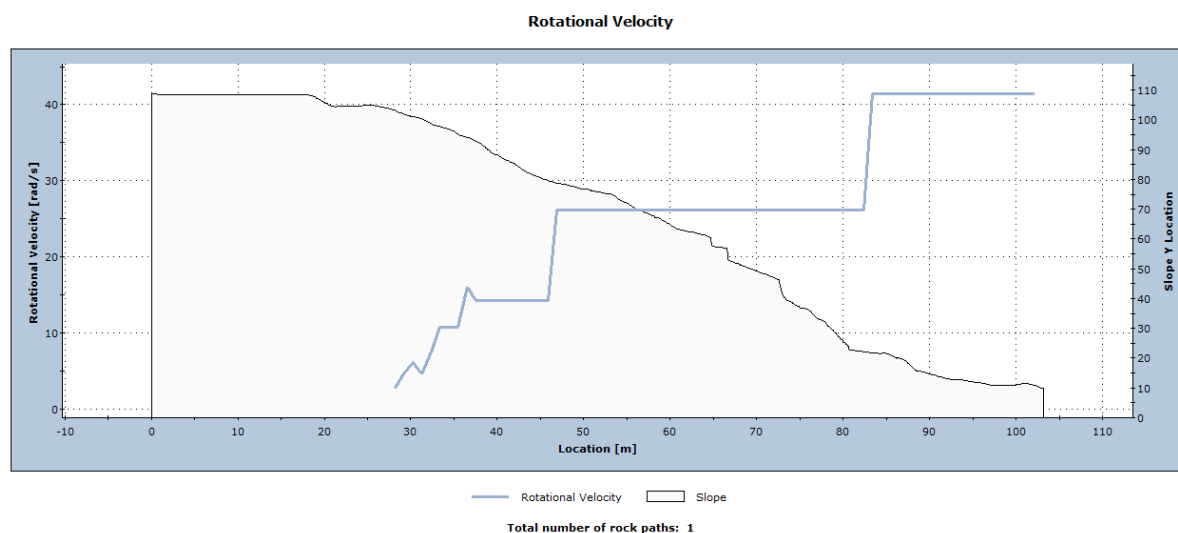


Figura 52 - Velocidades de rotação do bloco desprendido ao longo do perfil transversal do talude em estudo

6.2.1.4. Energia cinética

De seguida representam-se as distribuições de energia cinética (Figuras 53 e 54), nomeadamente a energia de translação, de rotação e energia cinética total, que corresponde à soma das duas primeiras.

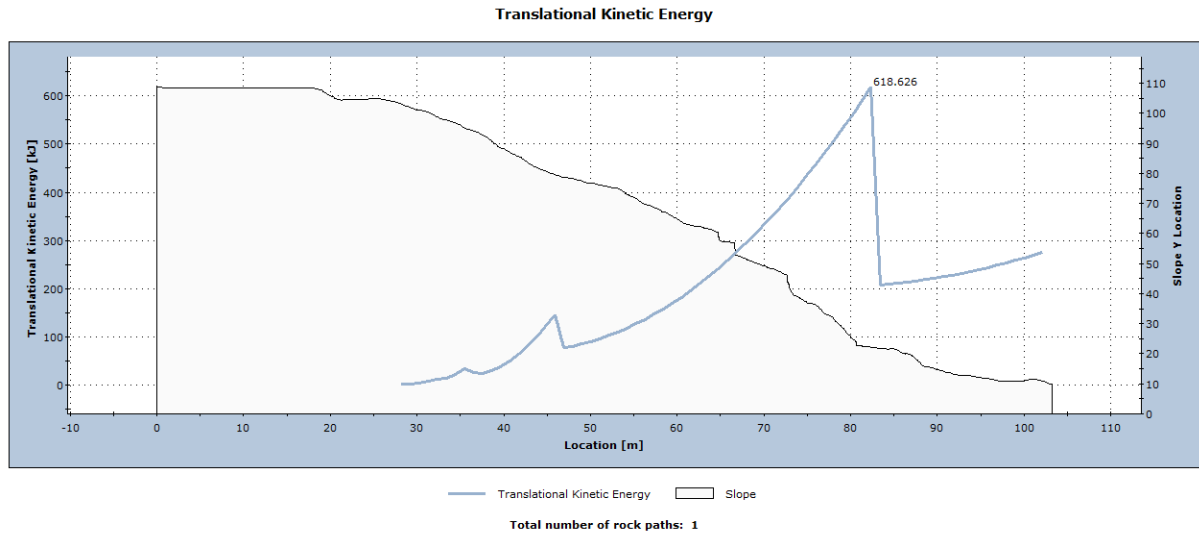


Figura 53 - Energias cinéticas de translação do bloco desprendido ao longo do perfil transversal do talude em estudo

De notar que os gráficos da energia e velocidade de translação têm uma forma semelhante, devido ao facto de a expressão de cálculo da energia cinética apenas depender da velocidade, visto que a massa do bloco é sempre a mesma ao longo da trajetória. O mesmo se aplica para a velocidade e energia de rotação.

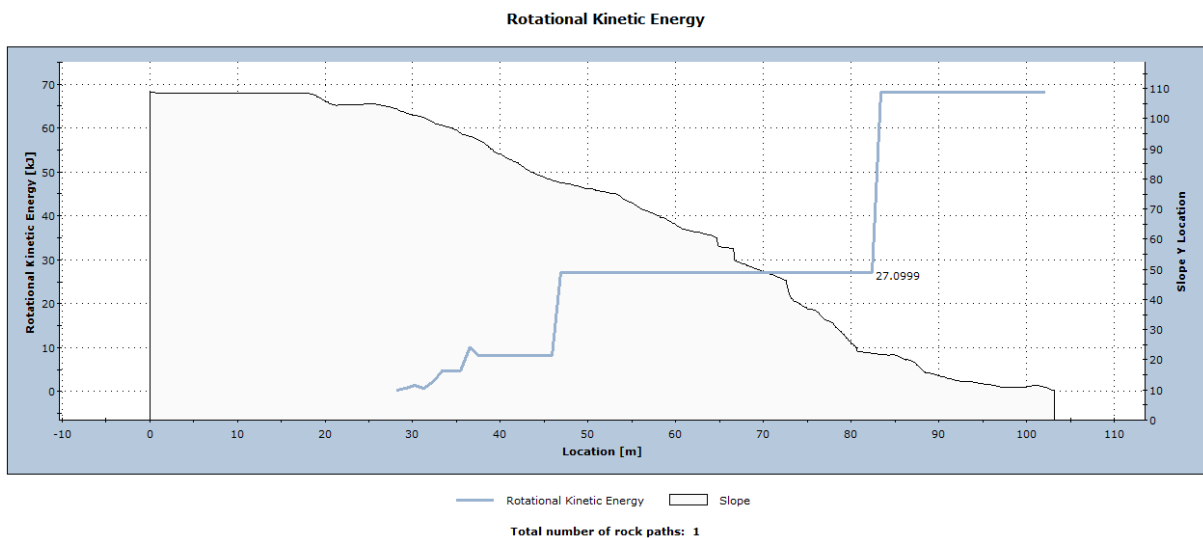


Figura 54 - Energias cinéticas de rotação do bloco desprendido ao longo do perfil transversal do talude em estudo

Foi considerado o momento imediatamente antes do último impacto entre o bloco e o talude. Como se verifica nas imagens, os valores das energias de translação e de rotação são, respetivamente, 618.626 e 27.0999 kJ. O resultado da soma destes dois valores é 645.726 kJ, que corresponde ao valor da energia cinética total nesse mesmo ponto (Figura 55).

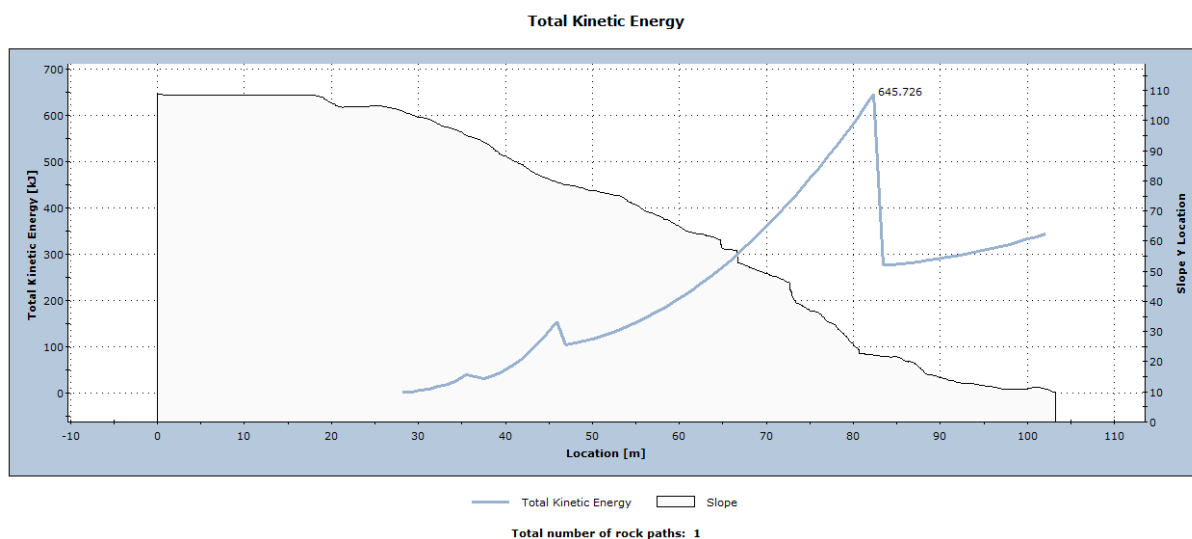


Figura 55 - Energias cinéticas totais do bloco desprendido ao longo do perfil transversal do talude em estudo

A Figura 56 apresenta o mesmo talude, em que apenas foi alterado o número de blocos desprendidos de um bloco para dez.

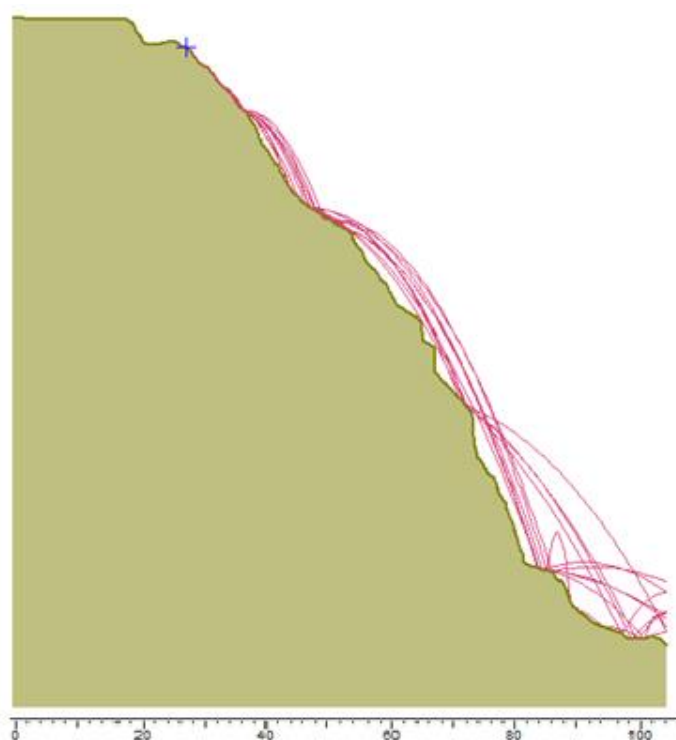


Figura 56 - Resultado da simulação da trajetória de dez blocos desprendidos de um único ponto do talude em estudo

É possível observar as diferentes trajetórias possíveis dos blocos, variando bastante entre si. Verifica-se que no início da trajetória os blocos têm movimento semelhante, porém, ao embater na face do talude

adquirem movimentos diferentes, o que comprova o que foi referido em capítulos anteriores relativamente à aleatoriedade e dificuldade na previsão das trajetórias dos blocos.

6.2.2. DIMENSIONAMENTO DA SOLUÇÃO

Para dimensionar a solução para este caso é necessário analisar a trajetória dos blocos. A altura máxima de ressalto foi de 17 metros e a energia máxima foi de 630 kJ. Como já foi dito anteriormente, o dimensionamento de barreiras flexíveis tem duas componentes: a altura e a capacidade. Considerando que a altura máxima atingida pelos blocos é de 17 metros, a barreira terá de ser colocada antes do ponto onde ocorre esta altura de ressalto, pois este valor é extremamente elevado para barreiras. Sendo que a altura mínima das barreiras é geralmente de 3 metros, então uma hipótese seria colocar a barreira num ponto do talude em que as alturas de ressalto dos blocos não ultrapassem esse valor (este ponto pode ser determinado no programa através da observação da distribuição das alturas de ressalto), de modo a escolher a solução mais económica. Visto que a barreira não será colocada no ponto da altura de ressalto e energia máximas, a sua capacidade já não terá de ser maior do que a energia máxima dos blocos de 630 kJ. Neste caso, através da distribuição de energia cinética, determina-se o valor da mesma no ponto onde a barreira será instalada; sabendo esse valor, é possível dimensionar a barreira e testar a solução.

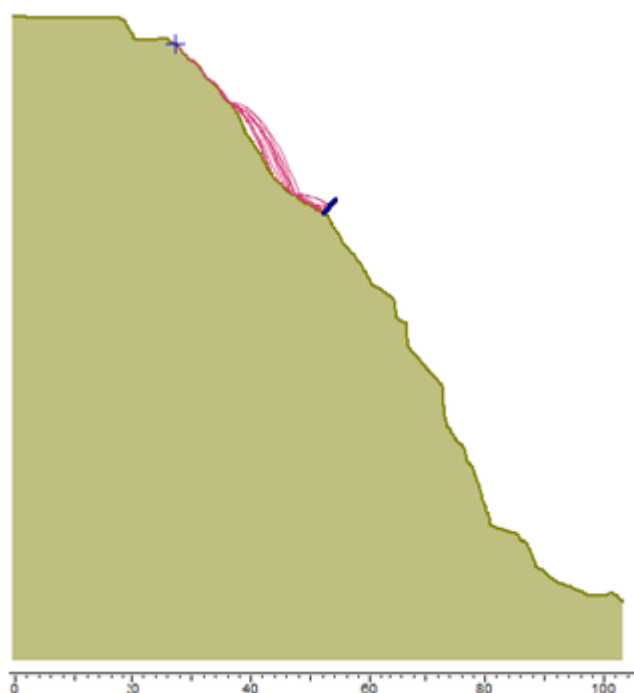


Figura 57 - Simulação da solução para a queda de dez blocos desprendidos de um único ponto do talude em estudo

Foi colocada uma barreira de 3 metros e com capacidade de, aproximadamente, 500 kJ, e como se pode observar pela Figura 57, a barreira intersesta a totalidade dos blocos desprendidos, o que significa que a sua capacidade de absorção de energia é superior à energia atingida pelos blocos nesse ponto, e que as alturas de ressalto são menores do que 3 metros, pelo que não transpõem a barreira. A Figura 58 representa a distribuição da energia cinética, em que se verifica que a energia imediatamente antes da

barreira se encontra na ordem dos 80 kJ, e corresponde ao último ponto no gráfico, porque depois da barreira não existem mais blocos desprendidos.

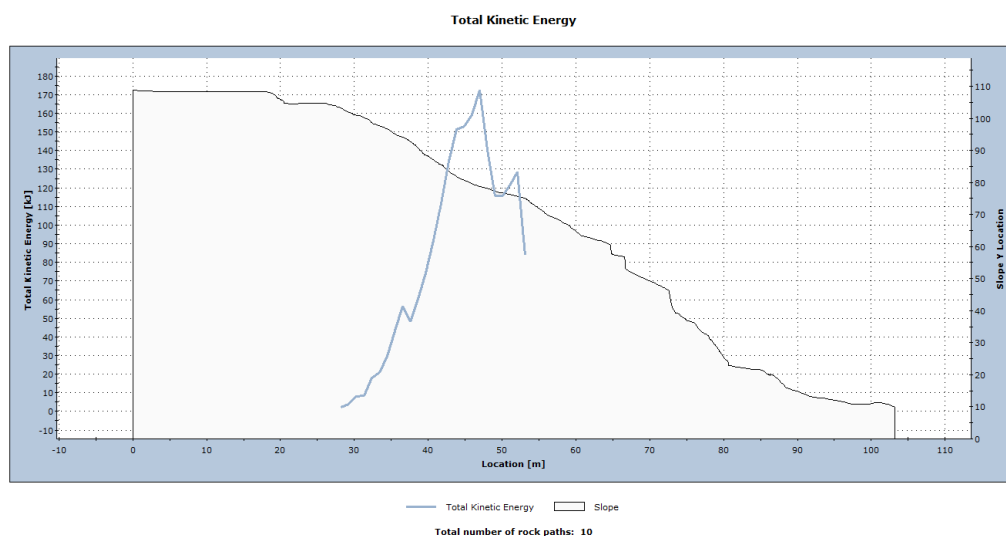


Figura 58 - Distribuição da energia cinética total dos blocos com a solução da barreira flexível

No caso anterior foi considerado que os blocos apenas se desprendiam de um ponto do talude, o que não é uma simulação realista, pois o desprendimento pode ocorrer em qualquer ponto do talude, sendo impossível de prever corretamente. Sendo assim, na simulação apresentada de seguida, foi considerado que os blocos se poderiam desprender do maciço em qualquer ponto da face do talude. Foram lançados cem blocos, cujas trajetórias se representam na Figura 59.

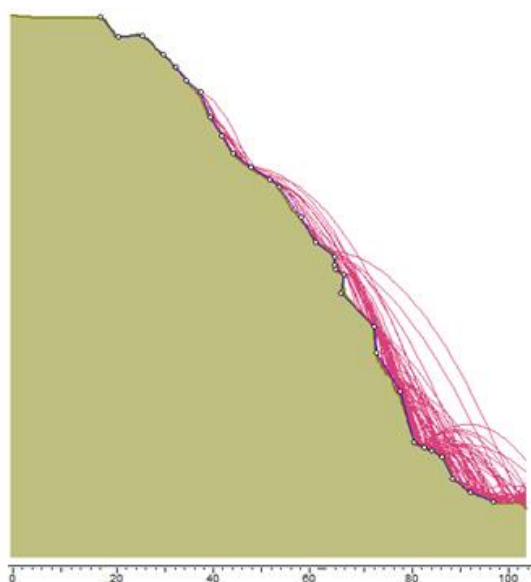


Figura 59 - Resultado da simulação da trajetória de cem blocos desprendidos ao longo de todo o perfil transversal do talude em estudo

Pela observação da imagem conclui-se que esta situação se torna bastante perigosa, com grandes quantidades de blocos a cair na base do talude e a atingir alturas elevadas, sendo a altura máxima neste caso de 15 metros. A Figura 60 mostra o resultado com a solução implantada no caso anterior.

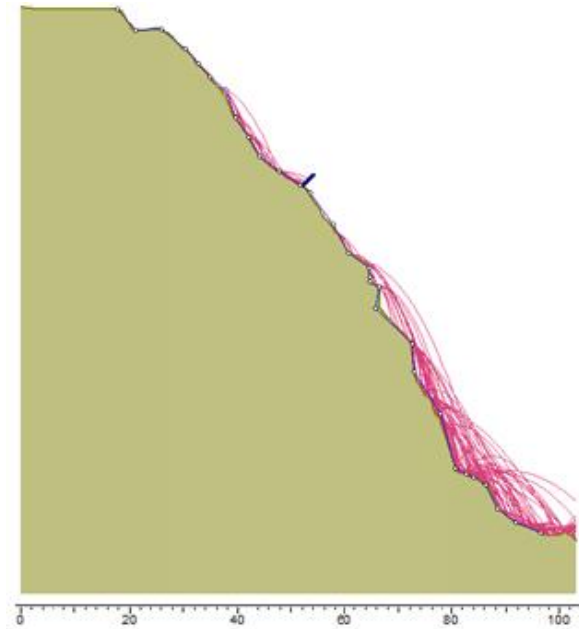


Figura 60 - Simulação da solução para a queda de cem blocos desprendidos ao longo de todo o perfil transversal do talude em estudo (uma barreira)

Apesar de a barreira intersetar todos os blocos vindos de cima, como existem mais blocos que se desprendem nas zonas abaixo da barreira, esta solução não é válida. Uma hipótese seria colocar a barreira numa cota inferior; porém, esta teria de ter uma altura de cerca de 15 metros, que é a altura máxima atingida pelos blocos. Como não existem barreiras com esta altura, seria indicada a colocação de duas barreiras. Foi então introduzida uma segunda barreira num ponto onde fosse possível intersetar as trajetórias dos blocos. Esta barreira teve de ser mais alta devido à distribuição das alturas de ressalto na sua zona de implantação. Foi usada uma barreira de 8 metros com a mesma capacidade da primeira; a solução é representada na Figura 61.

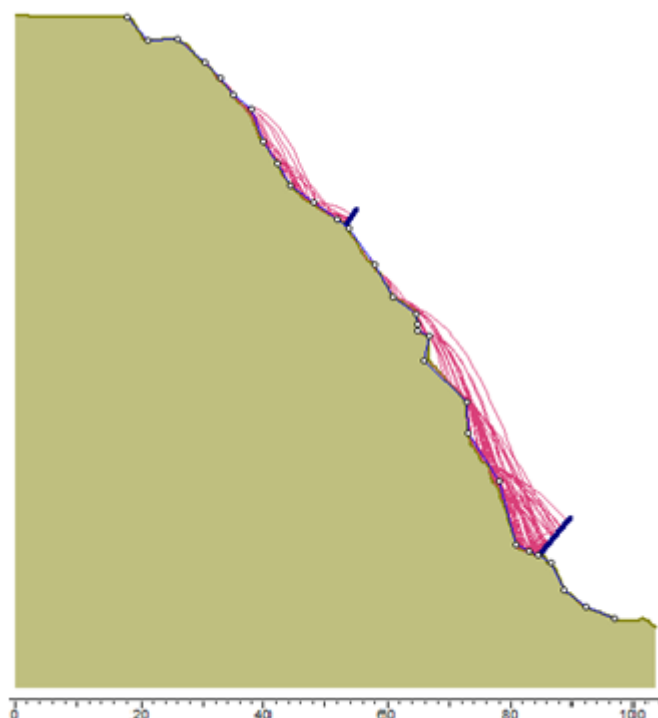


Figura 61 - Simulação da solução para a queda de cem blocos desprendidos ao longo de todo o perfil transversal do talude em estudo (duas barreiras)

Pela observação da figura verifica-se que a segunda barreira de 8 metros consegue deter a totalidade dos blocos desprendidos. Esta solução oferece segurança em relação à queda de blocos, porém não será económica, pois o custo de instalação duplica devido ao facto de serem colocadas duas barreiras; o custo da segunda barreira será também elevado pois tem uma altura considerável.

Com base na capacidade e altura exigida pelas barreiras, foi possível escolher de entre as barreiras disponíveis no programa: a primeira barreira é do tipo RMC 050 ICAT/2, com 3 metros, e tem uma capacidade de 500 kJ. A segunda barreira é do tipo RMC 850/A, com uma capacidade de 8600 kJ e uma altura de 8 metros. A capacidade desta barreira é bastante mais elevada para o nível de energia que é exigido, porém, como necessita de ter uma altura mínima de 8 metros, esta é a única barreira disponível que cumpre esse requisito. Em alternativa, poderia ser colocada uma barreira da empresa Geobrugg, do tipo RXI-500, que tem uma capacidade de 5000 kJ, mas que teria uma altura de 9 metros (ver Figura 44).

6.3. ESTUDOS PARAMÉTRICOS

Neste subcapítulo são apresentados os resultados dos estudos paramétricos realizados para diferentes características de que dependem as trajetórias e comportamento dos blocos: coeficiente de restituição e ângulo de atrito do maciço rochoso, massa e forma dos blocos, presença de vegetação no talude. Em cada estudo foi alterado apenas o valor do parâmetro correspondente ao caso, mantendo os restantes valores inalterados, de acordo com o que foi apresentado no quadro 6.

6.3.1. COEFICIENTE DE RESTITUIÇÃO

Para avaliar a influência do coeficiente de restituição na trajetória, altura, e energia cinética dos blocos, foram feitos dois estudos distintos, um para a componente normal e outro para a componente tangencial deste coeficiente.

6.3.1.1. Coeficiente de restituição normal

Para o estudo paramétrico do coeficiente de restituição normal foram tomados os valores de 0.25, 0.35 e 0.45. Sendo o valor atribuído a este coeficiente para o maciço rochoso em estudo de 0.35, foram feitas simulações com um valor inferior e um superior, para avaliar a influência que este parâmetro tem na trajetória e energia cinética dos blocos.

A Figura 62 representa os resultados das simulações realizadas em função da variação do coeficiente de restituição normal, respetivamente, 0.25, 0.35 e 0.45, da esquerda para a direita na figura.



Figura 62 - Influência do coeficiente de restituição normal na trajetória dos blocos, da esquerda para a direita: $R_n=0.25, 0.35$ e 0.45

Observando a figura, verifica-se que as alturas de ressalto aumentam com o valor do coeficiente de restituição, o que é lógico, visto que este coeficiente representa a perda de energia, ou de velocidade, dos blocos segundo a direção normal ao seu movimento. Isto é, quanto maior o valor do coeficiente de restituição normal do material constituinte do talude, menor será a energia absorvida pelo mesmo, e maior será o alcance dos blocos, ou seja, a altura de ressalto.

Na Figura 63 apresenta-se o gráfico, exportado do programa *Rocfall* para *Excel*, com as distribuições das alturas de ressalto dos blocos em função da distância medida na horizontal do perfil transversal do talude, para cada valor do coeficiente de restituição considerado neste estudo. Os resultados apresentados no gráfico são coerentes com o que foi dito anteriormente, pois é evidente, na maior parte do gráfico, a posição das três linhas. A linha do valor do coeficiente de restituição de 0.45 (verde) está claramente acima das outras duas, enquanto que a linha dos 0.35 (vermelha) encontra-se maioritariamente no meio dessa e da linha dos 0.25 (azul).

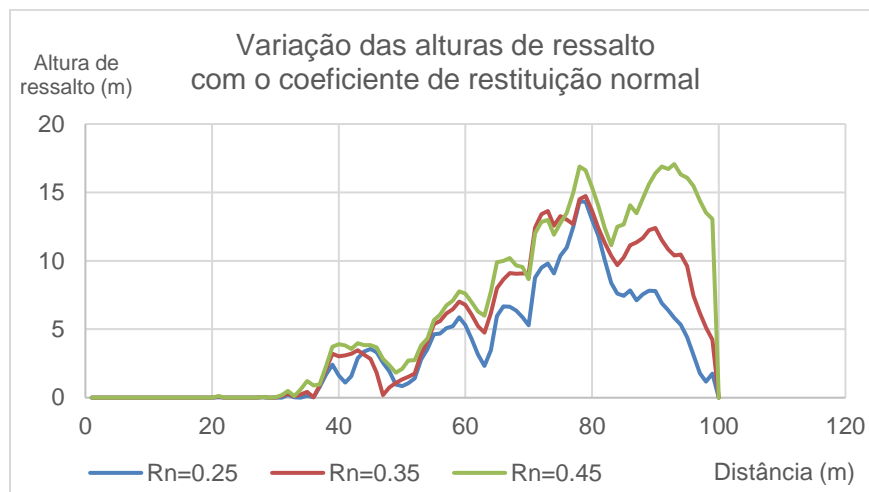


Figura 63 - Variação das alturas de ressalto com o coeficiente de restituição normal

A Figura 64 representa as distribuições de energia cinética para os três valores do coeficiente. Apesar de não ser tão claro como no gráfico das distribuições das alturas de ressalto, verifica-se também, em grande parte do gráfico, que a linha dos 0.45 (verde) se encontra mais alta do que as outras duas. No início da trajetória as linhas encontram-se aproximadas, mas a partir dos 50 metros observa-se um aumento de energia, em que a linha dos 0.45 atinge o valor mais elevado, visto que este coeficiente é o que faz com que os blocos conservem uma maior percentagem de energia e velocidade.

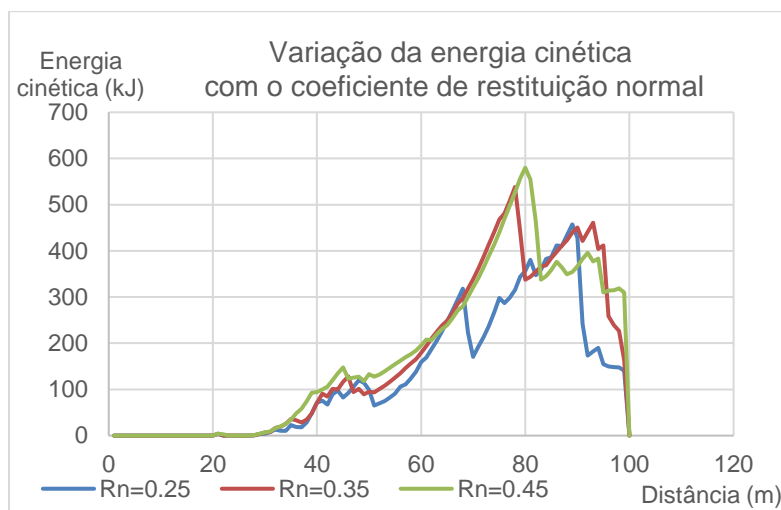


Figura 64 - Variação da energia cinética com o coeficiente de restituição normal

Comparando estes gráficos com a Figura 62, em que são representadas as trajetórias dos blocos, observa-se que no início da trajetória as alturas de ressalto e energias são aproximadas, e a partir do primeiro ressalto nota-se uma diferença entre os três casos. Isto porque os blocos perdem diferentes percentagens de energias e velocidades nos choques com o talude, logo nestes momentos é que se vão alterar as trajetórias dos blocos.

Quanto à solução de proteção, foi colocada a mesma do primeiro caso (uma barreira de 3 metros e outra de 8), para a situação do coeficiente de restituição normal igual a 0.45, que é o caso mais desfavorável, e cujo resultado se mostra na Figura 65.

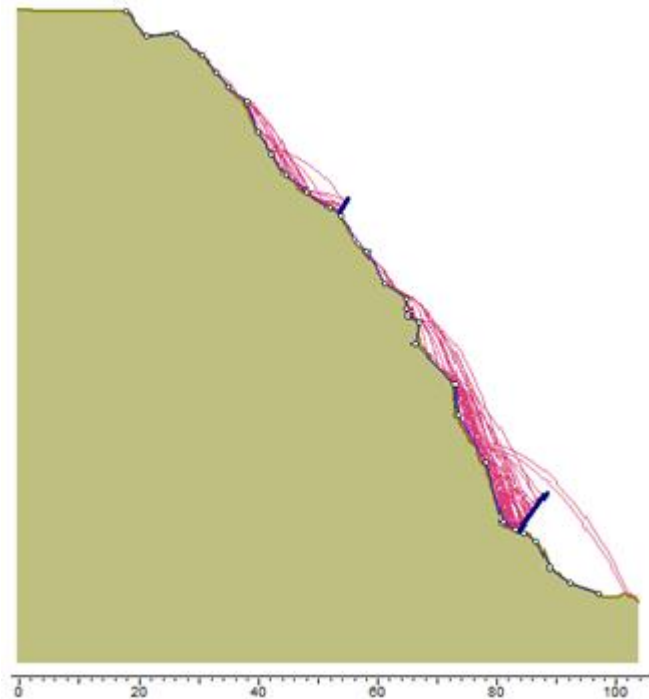


Figura 65 - Simulação da solução para o caso mais desfavorável ($R_n=0.45$)

Pela observação da imagem verifica-se que existem dois blocos que conseguem transpor a barreira, o que corresponde a uma probabilidade de 2% de os mesmos atingirem a zona do pé do talude. Visto que as alturas de ressalto desses blocos são superiores a 10 metros na zona da barreira, e visto que não há barreiras com essa altura disponíveis, será necessário encontrar outra solução. Uma opção seria colocar a barreira numa cota superior, como é representado na Figura 66, e deste modo a segunda barreira consegue deter a maioria dos blocos que atingem elevadas alturas de ressalto e energias. Existem apenas três blocos que se desprendem abaixo da barreira e continuam a atingir a zona de risco; porém, têm velocidades e alturas de ressalto reduzidas, logo não vão ter tanto impacto como os blocos que atingem a mesma zona no caso anterior. Seria feita uma análise de risco para decidir entre as duas soluções, sendo que a segunda barreira teria de ter uma capacidade de, pelo menos 370 kJ, logo, poderia ser utilizada a barreira do tipo RMC 850/A, tal como no caso anterior.

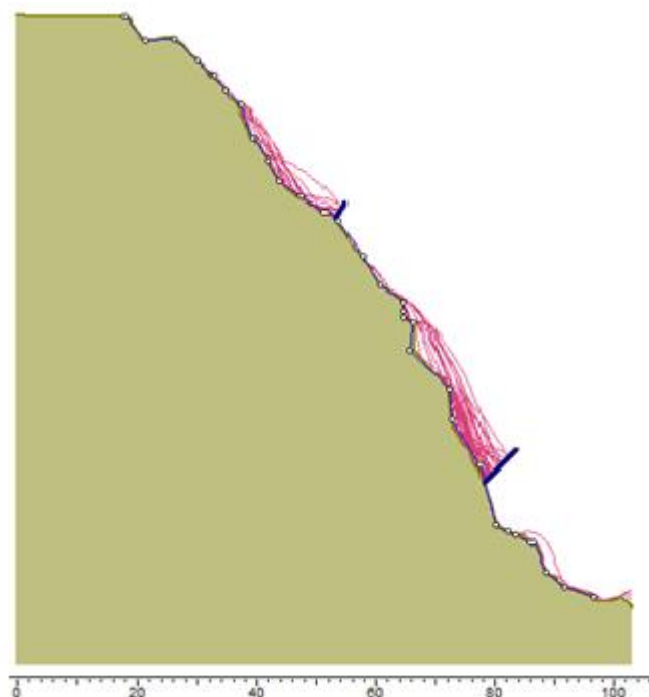


Figura 66 - Alternativa de solução para o caso mais desfavorável ($R_n=0.45$)

6.3.1.2. Coeficiente de restituição tangencial

Para o coeficiente de restituição tangencial foram assumidos os valores de 0.8, 0.85 e 0.9, visto que valores superiores a 0.9 seriam irrealistas. As trajetórias são apresentadas na Figura 67, respetivamente, com os valores de 0.8, 0.85 e 0.9, da esquerda para a direita.

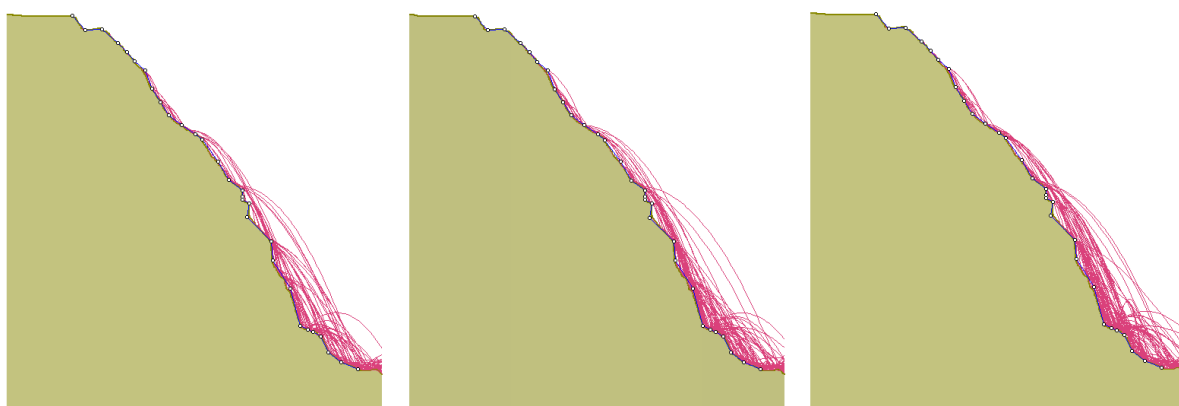


Figura 67 - Influência do coeficiente de restituição tangencial na trajetória dos blocos, da esquerda para a direita:
 $R_t=0.8, 0.85$ e 0.9

Ao contrário do que acontece no estudo do coeficiente de restituição normal, a diferença entre a trajetória não é tão óbvia. O que se verifica é que, quanto maior o valor da componente tangencial do coeficiente, maior quantidade de blocos atingem a zona inferior do talude. Isto deve-se ao facto de os blocos não

perderem tanta energia na direção do seu movimento. Ou seja, os impactos com o talude não vão afetar tanto o alcance dos blocos nem a sua velocidade.

Em relação às alturas de ressalto, pela observação do gráfico da Figura 68, conclui-se que apesar de existirem diferenças nas distribuições das alturas, não existe uma relação direta com este parâmetro. Analisando o gráfico, verifica-se que na zona dos 40 metros a maior altura de ressalto corresponde ao coeficiente com o valor de 0.9 (verde), enquanto que na zona dos 60 metros a maior altura corresponde à linha dos 0.85 (vermelha), e finalmente, a altura máxima de ressalto é atingida pelo coeficiente com o valor de 0.8 (azul).

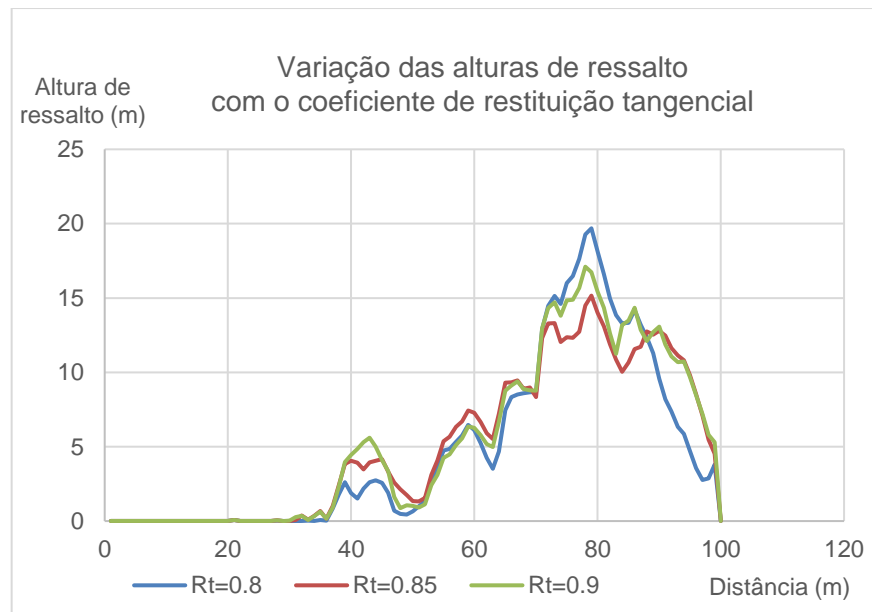


Figura 68 - Variação das alturas de ressalto com o coeficiente de restituição tangencial

A Figura 69 representa a distribuição da energia cinética em função dos valores do coeficiente de restituição tangencial. Pela análise do gráfico é possível estabelecer uma relação entre o parâmetro e a energia cinética atingida pelos blocos; observa-se que a linha dos 0.9 (verde) está acima das outras linhas quase na totalidade do gráfico; a linha dos 0.85 (vermelha) encontra-se no meio e a linha dos 0.8 (azul) encontra-se abaixo das outras. Isto seria de esperar, visto que os blocos perdem menos energia quanto maior for o valor do coeficiente. A influência que este coeficiente tem na trajetória dos blocos é, portanto, evidente na distribuição das energias cinéticas, mas não na distribuição das alturas de ressalto, aparentemente.

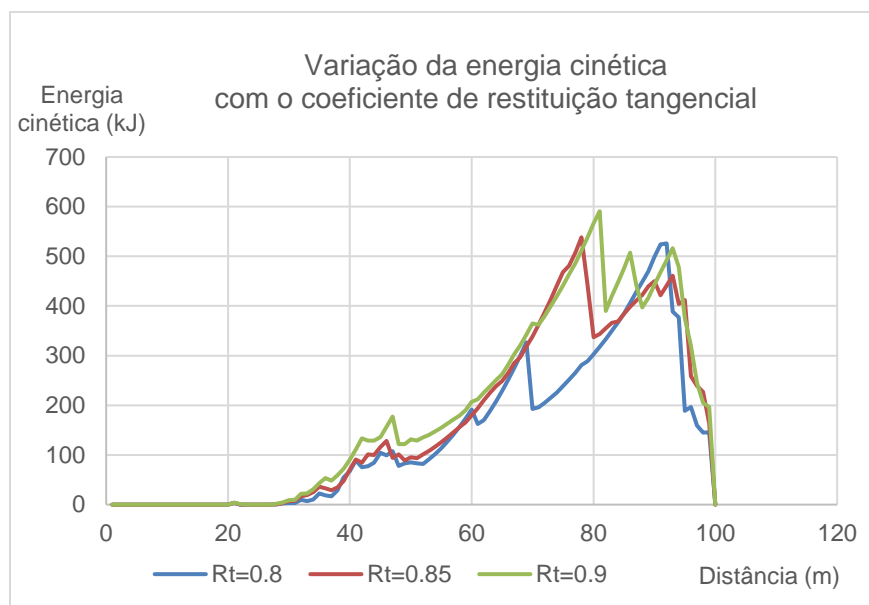


Figura 69 - Variação da energia cinética com o coeficiente de restituição tangencial

A Figura 70 representa o resultado da simulação com o coeficiente de restituição tangencial de 0.9, que representa o caso mais desfavorável em termos de energias. Mais uma vez, foi colocada a solução do primeiro caso, uma barreira RMC 050 ICAT/2 com 3 metros e uma RMC 850/A com 8 metros, mas a segunda barreira foi colocada num ponto mais abaixo do que no caso anterior. Deste modo, todos os blocos são detidos pela barreira, não havendo perigo de alcançarem a zona da base do talude.

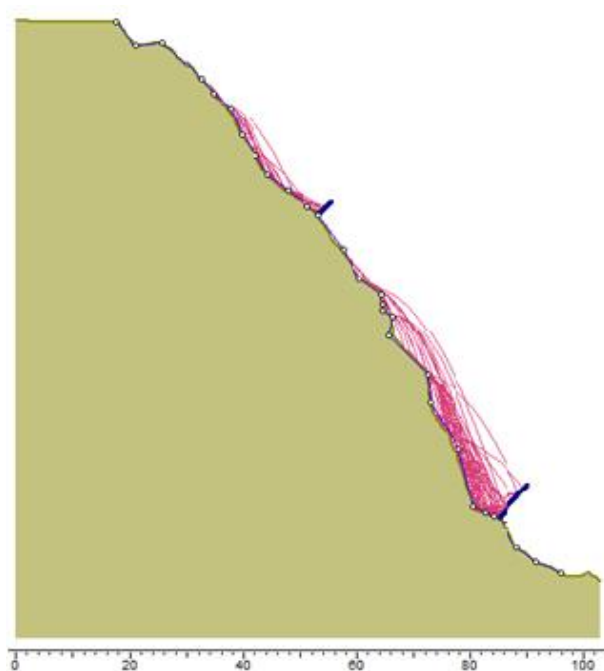


Figura 70 - Simulação da solução para o caso do coeficiente de restituição tangencial igual a 0.9

Apesar de esta ser uma solução segura, é também dispendiosa, devido ao custo de instalação de duas barreiras e de a segunda barreira ter uma altura e capacidade elevadas. Por este motivo, foi feita uma simulação substituindo a segunda barreira de 8 metros por uma de 6 metros, do tipo RMC 300/A, com uma capacidade de 3000 kJ, cujo resultado está representado na Figura 71.

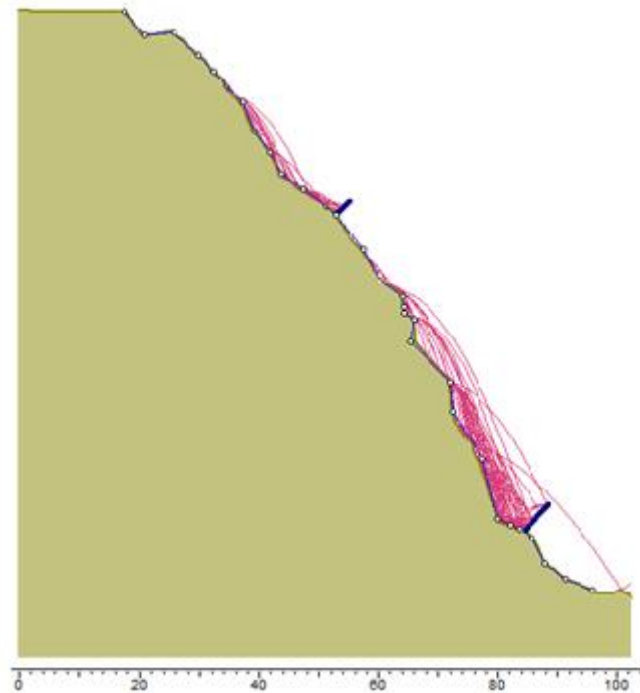


Figura 71 - Alternativa de solução para o caso do coeficiente de restituição tangencial igual a 0.9

Verifica-se que apenas um dos blocos transpõe a barreira, o que resulta numa probabilidade de os blocos atingirem a zona de risco de 1%; sendo este valor bastante reduzido, poderá ser considerada a adoção desta solução.

No caso de o coeficiente de restituição ser igual a 0.8, que é o valor que provoca a altura de ressalto máxima, a segunda barreira teria de ter uma altura de 9 metros, como é representado na Figura 72. Porém, como não existem barreiras da empresa Maccaferri disponíveis no programa, teria de ser escolhida uma da empresa Trumer Schutzbauten, do tipo TS-5000-ZD, com uma altura de 9 metros e capacidade de 5000 kJ. Poderia também ser colocada uma barreira de 9 metros fabricada pela empresa Geobrugg.

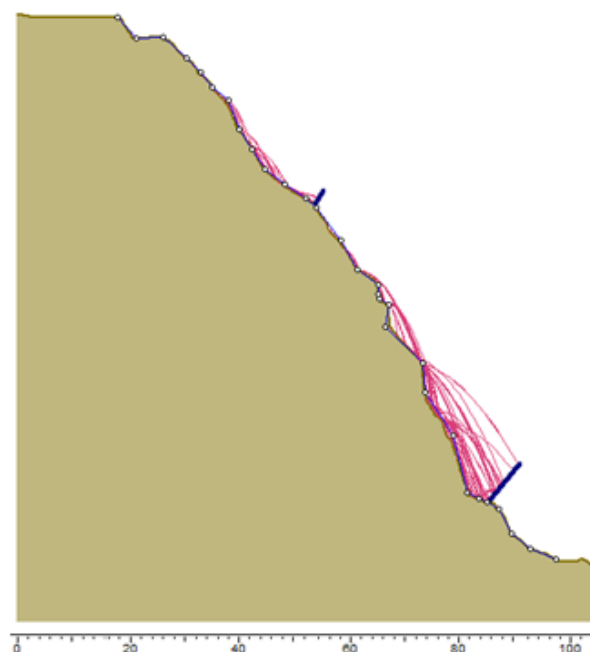


Figura 72 - Simulação da solução para o caso do coeficiente de restituição tangencial igual a 0.8

6.3.2. ÂNGULO DE ATRITO

Os valores considerados no estudo do ângulo de atrito foram de 27°; 30° e 35°. Sendo o valor estimado para este parâmetro de 30°, foi assumido um valor superior de 35°, que é um valor razoável, visto que se trata de um maciço rochoso e que nas sondagens foram obtidos valores de 37°. Foi considerado o valor de 27° para o ângulo de atrito inferior, pois um valor menor do que este não seria realista, tendo em conta as características do maciço.

Na Figura 73 são representadas as três trajetórias para cada valor do ângulo de atrito, respetivamente, 27°, 30° e 35°, da esquerda para a direita. Pela observação da imagem é possível identificar algumas diferenças na trajetória dos blocos.

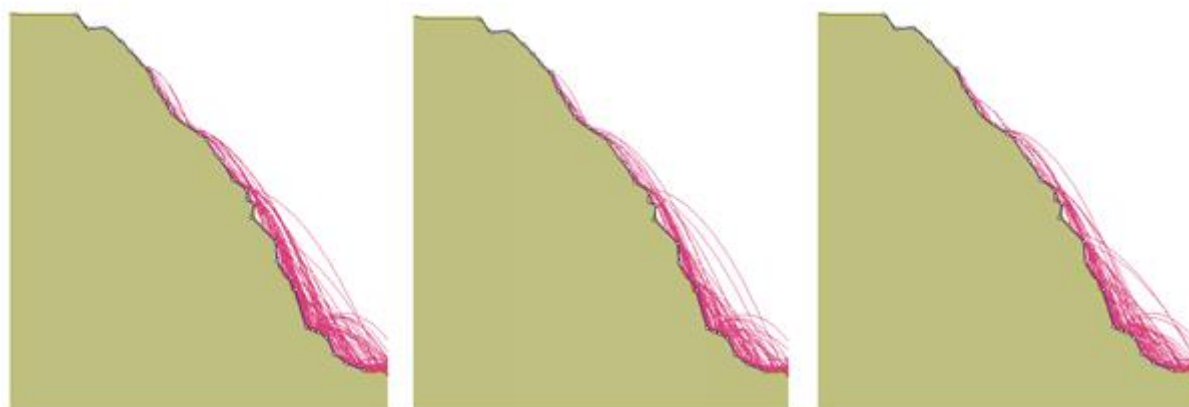


Figura 73 - Influência do coeficiente de restituição tangencial na trajetória dos blocos, da esquerda para a direita: $\phi=27^\circ$, $\phi=30^\circ$ e $\phi=35^\circ$

As distribuições das alturas de ressalto e da energia cinética dos blocos são representadas nas Figuras 74 e 75. Analisando os gráficos, verificam-se pequenas diferenças nas distribuições das alturas de ressalto e energias, mas não é possível determinar ao certo a influência que este parâmetro tem na trajetória dos blocos.

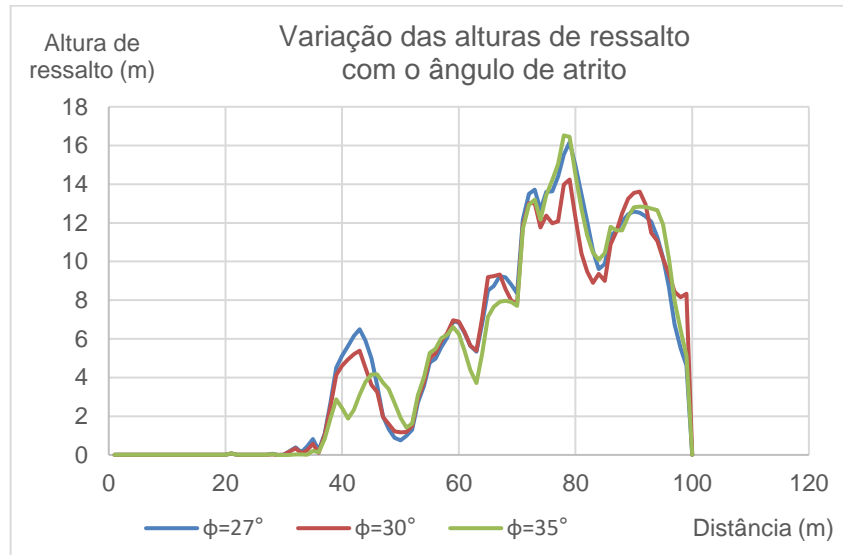


Figura 74 - Variação das alturas de ressalto com o ângulo de atrito

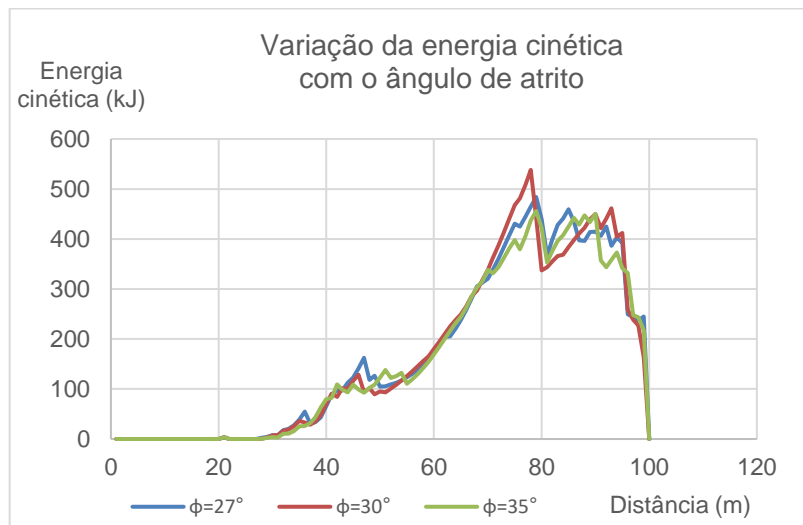


Figura 75 - Variação da energia cinética com o ângulo de atrito

Em relação à solução para este caso, verificou-se que, qualquer que fosse o valor do ângulo de atrito, a solução das duas barreiras do tipo RMC 050 ICAT/2, com 3 metros, e RMC 850/A, com 8 metros, era segura, não havendo perigo de os blocos atingirem a zona de risco. Conclui-se então que o ângulo de atrito não tem uma grande influência na trajetória dos blocos.

6.3.3. MASSA DOS BLOCOS

Em relação à massa dos blocos, foram feitos três estudos com as massas de 500, 1000 e 5000 kg. A representação das trajetórias dos blocos para os três casos não é aqui representada pois, como se pode comprovar pelo gráfico presente na Figura 76, a altura de ressalto é igual para todos os casos. Isto significa que o programa calcula a trajetória dos blocos com base nas características do talude (coeficiente de restituição, ângulo de atrito, etc) e não nas características do bloco (massa e densidade), assumindo que as alturas de ressalto são as mesmas, independentemente do valor da massa, que é utilizada para calcular a energia cinética.

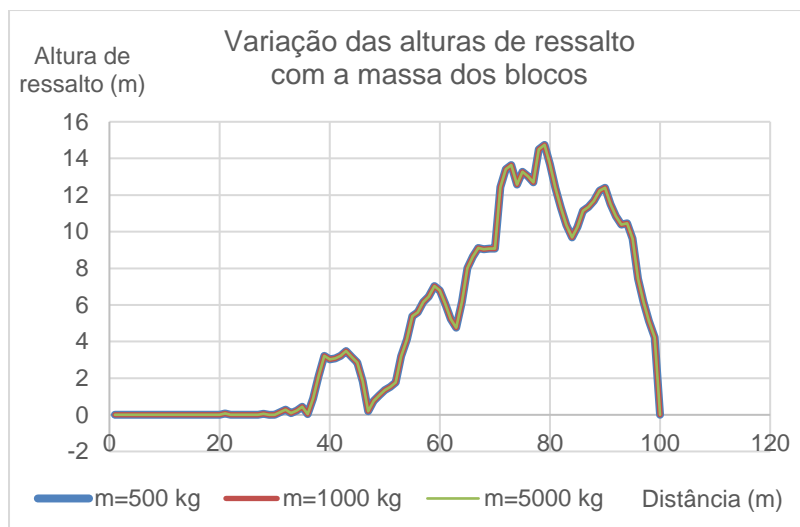


Figura 76 - Variação das alturas de ressalto com a massa dos blocos

Observando agora a distribuição da energia cinética, através do gráfico da Figura 77, é possível avaliar a influência da massa dos blocos; visto que a energia cinética é diretamente proporcional à massa, o aumento da mesma fará aumentar a energia na mesma proporção, o que é comprovado pela análise do gráfico. O valor máximo da energia cinética, aproximadamente nos 78 metros, para a distribuição correspondente à massa dos blocos igual a 500 kg (linha azul) é de 269 kJ; para a linha dos 1000 kg (vermelha), o valor máximo é de 538 kJ, que corresponde ao dobro do valor dos 500 kg, visto que a massa duplica; finalmente, para o valor correspondente aos 5000 kg (linha azul), o valor da energia é de 2690 kJ, ou seja, cinco vezes o valor da energia correspondente aos 1000 kg.

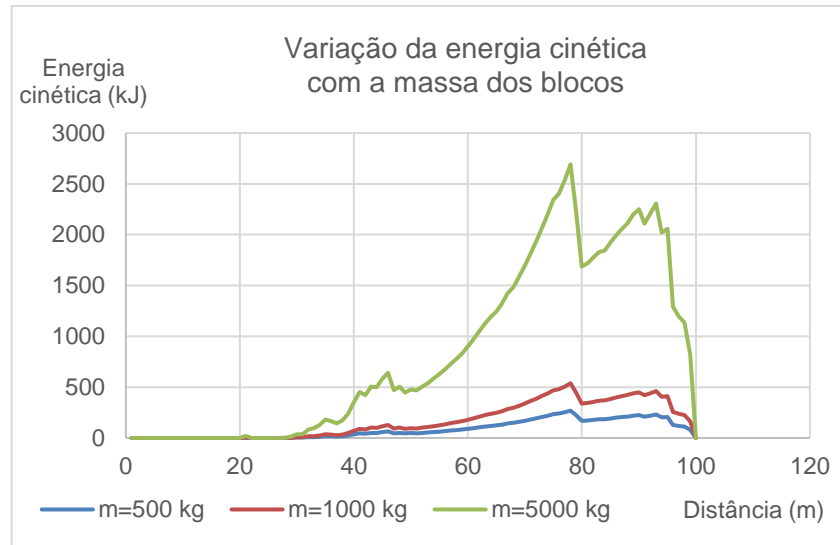


Figura 77 - Variação da energia cinética com a massa dos blocos

Tendo em conta que a massa dos blocos não altera em nenhum ponto a sua trajetória, mas sim a sua energia, para dimensionar as barreiras para este caso seria necessário apenas alterar a capacidade das mesmas. A Figura 78 representa o caso dos blocos com massa de 5000 kg, em que a segunda barreira não tem capacidade suficiente para aguentar todos os blocos que nela embatem, porque os blocos com massa de 5000 kg atingem energias muito superiores aos casos anteriores, logo o programa assume que os blocos a atravessam e continuam normalmente a sua trajetória.

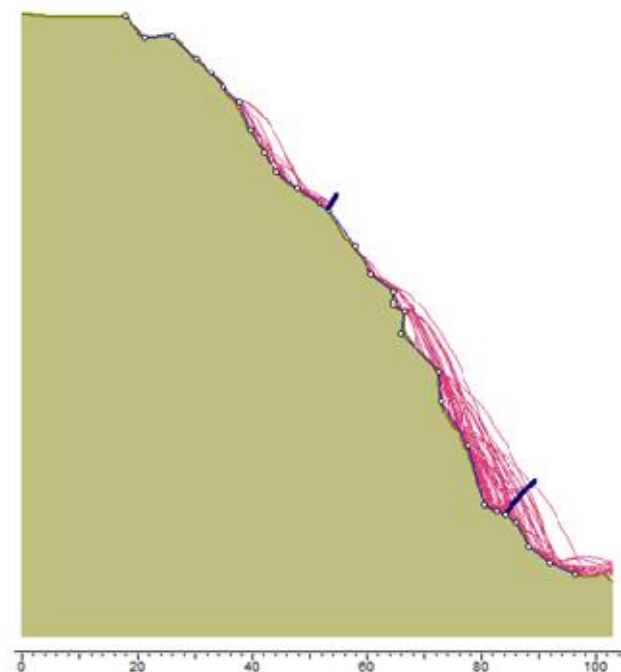


Figura 78 - Simulação da solução para o caso da massa dos blocos igual a 5000 kg (barreira com capacidade insuficiente)

Será preciso então uma barreira com maior capacidade de absorção de energia. A barreira do tipo RMC 850/A, com uma capacidade de 8600 kJ, é suficiente para aguentar estes níveis de energia.

6.3.4. PRESENÇA DE VEGETAÇÃO

Para representar o talude o mais realisticamente possível, foi introduzida uma secção com características diferentes (Figura 79) para simular a vegetação presente na maior parte da face do talude, com base na fotografia apresentada na Figura 47.

Visto que a vegetação tem um efeito amortecedor, o seu coeficiente de restituição terá de ser menor, pois os blocos vão perder mais energia e velocidade do que quando chocam com rocha. Como a vegetação não é esparsa e de pequeno porte, admitiu-se que os valores do coeficiente de restituição normal e tangencial não diminuiriam muito. Os valores arbitrados para os parâmetros da secção do talude com vegetação são apresentados no Quadro 7.

Quadro 7 - Propriedades do talude coberto com vegetação

Propriedades do talude com vegetação		
coeficiente de restituição		ângulo de atrito (°)
normal	tangencial	
0.30	0.80	30

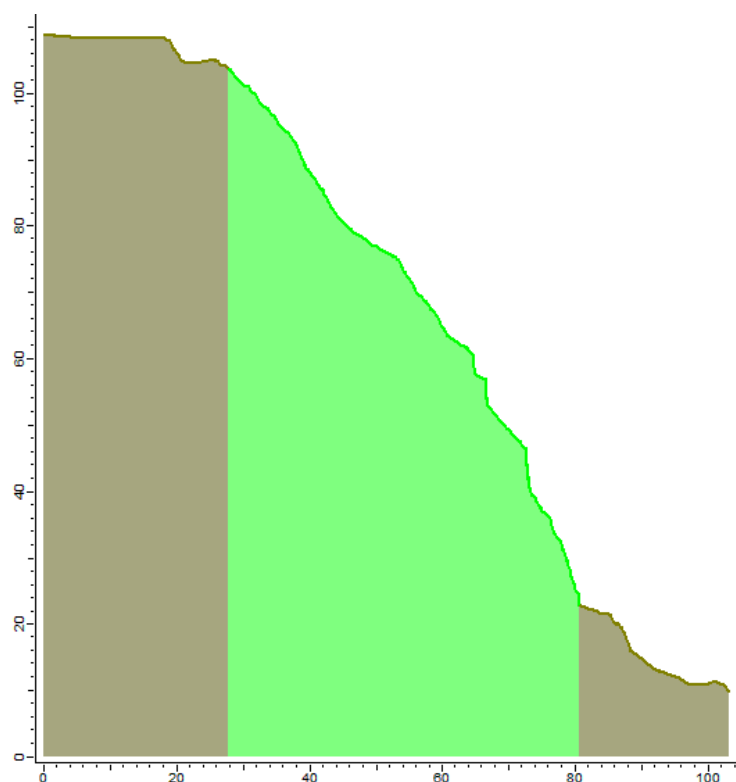


Figura 79 - Perfil transversal do talude com revestimento de vegetação (secção intermédia)

Foram lançados cem blocos, tal como nos casos anteriores, e os resultados da simulação estão apresentados na Figura 80.

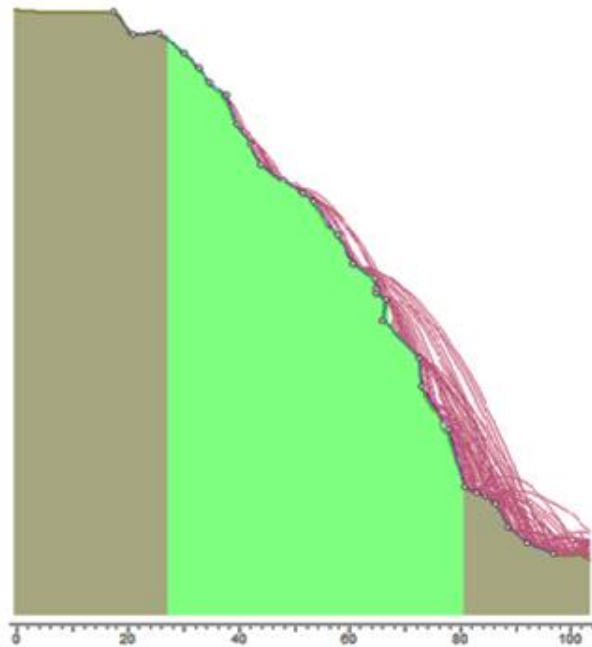


Figura 80 - Resultado da simulação da queda de cem blocos ao longo de todo o perfil do talude, com revestimento de vegetação

Observando agora os gráficos das Figuras 81 e 82, verifica-se que as alturas de ressalto e energias na simulação do talude revestido com vegetação são menores do que no caso do talude constituído apenas por material rochoso, visto que o revestimento vegetal da rocha amortece o choque dos blocos, atenuando o seu efeito destrutivo.

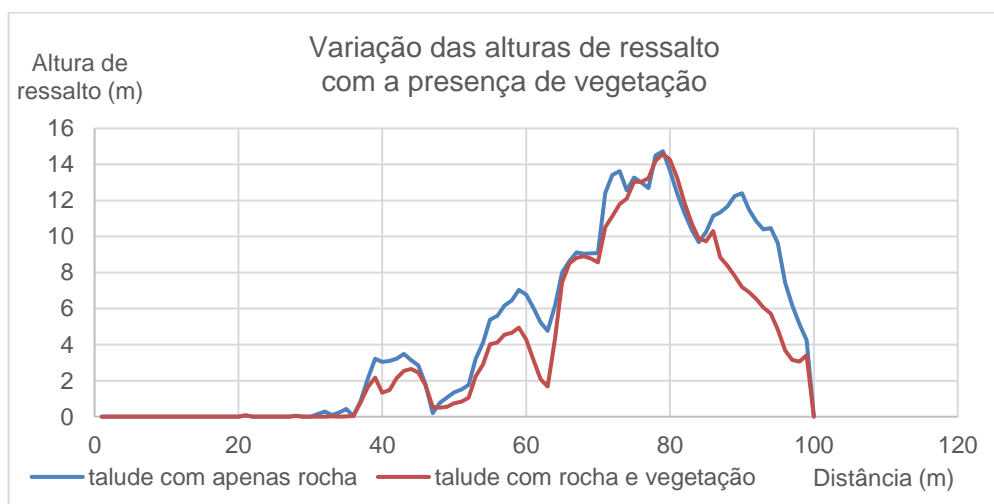


Figura 81 - Variação das alturas de ressalto com a presença de vegetação

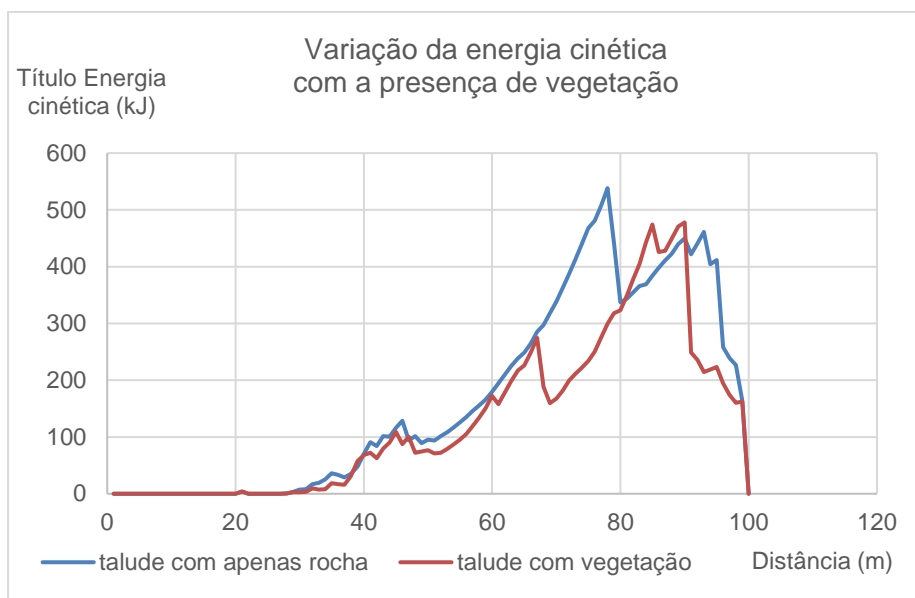


Figura 82 - Variação da energia cinética com a presença de vegetação

Na Figura 83 é apresentada a solução adotada para este caso; devido ao facto de a presença da vegetação gerar menores alturas de ressalto, a segunda barreira, que na maioria dos casos anteriores media 8 metros, foi substituída por uma de 6 metros, e como se pode verificar pela figura, todos os blocos são intercetados pela mesma.

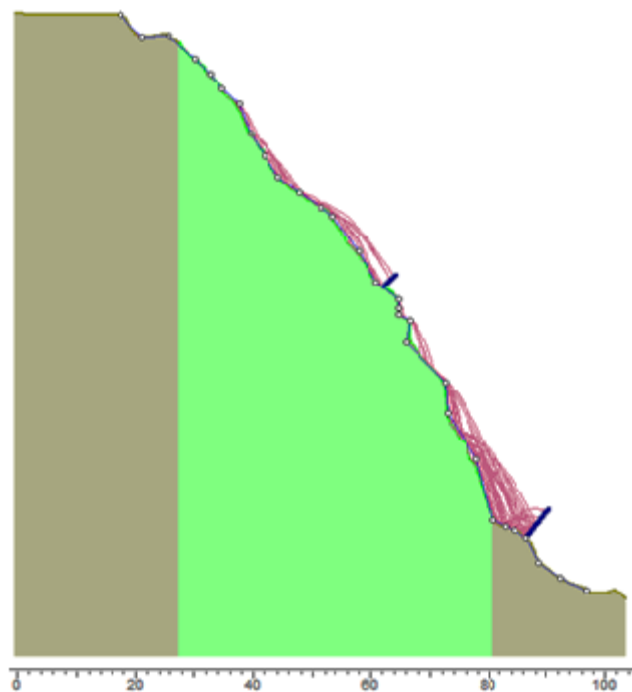


Figura 83 - Simulação da solução para o caso do talude com vegetação

Esta barreira necessita de ter uma capacidade de, pelo menos, 260 kJ; no entanto, como a escolha das barreiras é limitada às barreiras disponíveis pelas empresas, e a barreira tem de ter, no mínimo, 6 metros, haverá que colocar uma com capacidade superior à exigida. Foi escolhida uma barreira do tipo RMC 300/A, com capacidade de absorção de energia de 3000 kJ.

Conclui-se então que a presença de vegetação é benéfica para a redução dos danos causados pelo desprendimento de blocos, mesmo que em quantidades reduzidas, e permite a implantação de uma barreira com menores dimensões, logo teoricamente mais económica.

6.3.5. INFLUÊNCIA DO NÚMERO DE BLOCOS DESPRENDIDOS

As simulações anteriores foram executadas com o número de blocos desprendidos igual a cem. Neste caso, será estudada a variação nas trajetórias dos blocos se esse número for aumentado para mil, no caso em que o talude é composto por duas secções, uma correspondente ao maciço rochoso e outra a representar o revestimento vegetal que o mesmo possui, visto que esta é a representação mais realista do talude em estudo. Na Figura 84 é representado o resultado da simulação com mil blocos a serem desprendidos do talude.

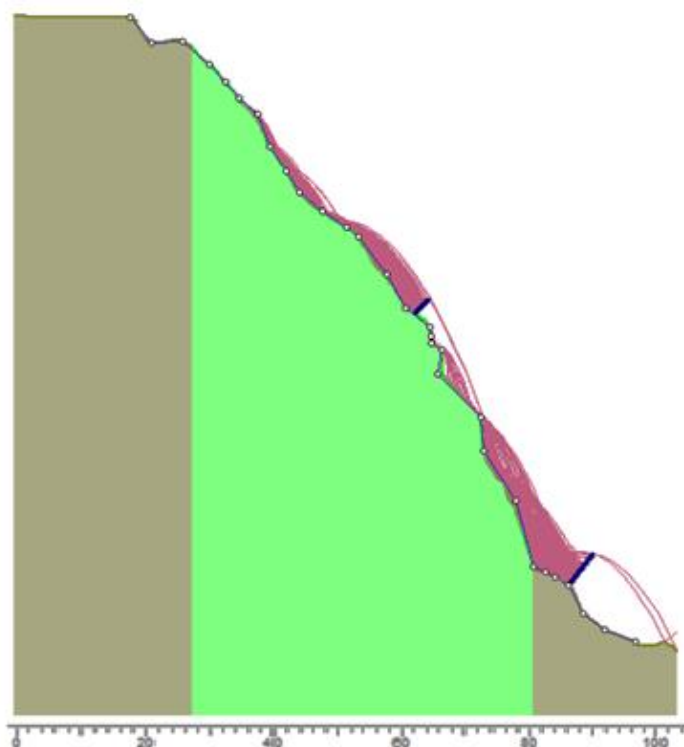


Figura 84 - Resultado da simulação da queda de mil blocos ao longo de todo o perfil do talude, com revestimento de vegetação, com a solução do caso de cem blocos

Analisando a figura, verifica-se que apesar de, no geral, a trajetória dos blocos ser semelhante ao caso anterior, existem três blocos que conseguem transpor as barreiras, nomeadamente um bloco na primeira barreira e dois na segunda, ainda que por pouca distância. Para resolver este problema foram feitas análises de sensibilidade das barreiras.

6.3.6. ANÁLISES DE SENSIBILIDADE

O *software Rocfall* permite a execução de análises de sensibilidade, com o objetivo de otimizar a colocação da barreira flexível. As variáveis disponíveis para análise são a localização no perfil transversal do talude, a inclinação, a altura e a capacidade da barreira. A análise de sensibilidade consiste na variação destes parâmetros, podendo ser escolhido o número de casos a analisar, e depois é possível determinar a solução ótima. A análise de sensibilidade aumenta o tempo de computação, pois o programa faz os cálculos várias vezes devido ao número de casos que analisa.

A primeira análise de sensibilidade foi feita variando a localização da primeira barreira (de cota superior), como se mostra na Figura 85. Foram considerados dez casos, que é o valor que o programa assume por defeito.

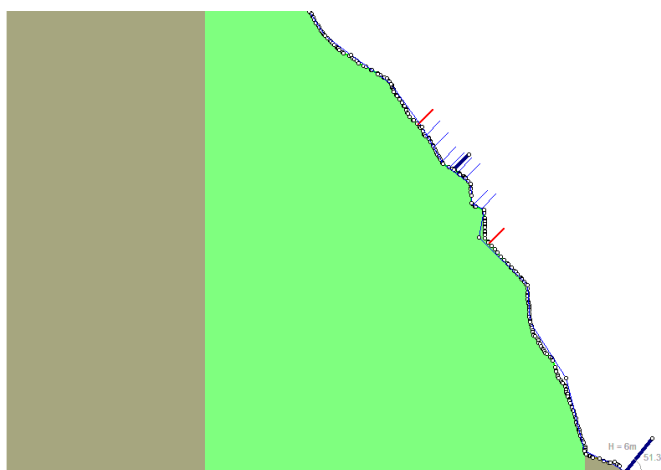


Figura 85 - Análise de sensibilidade da primeira barreira: localização no perfil transversal do talude

Analisando a Figura 86, onde se pode ver as diferentes localizações da barreira e as trajetórias dos blocos, verifica-se que a segunda posição abaixo da barreira consegue intercepar todos os blocos. É então selecionada esta localização, e o programa apresenta os resultados para a nova localização.

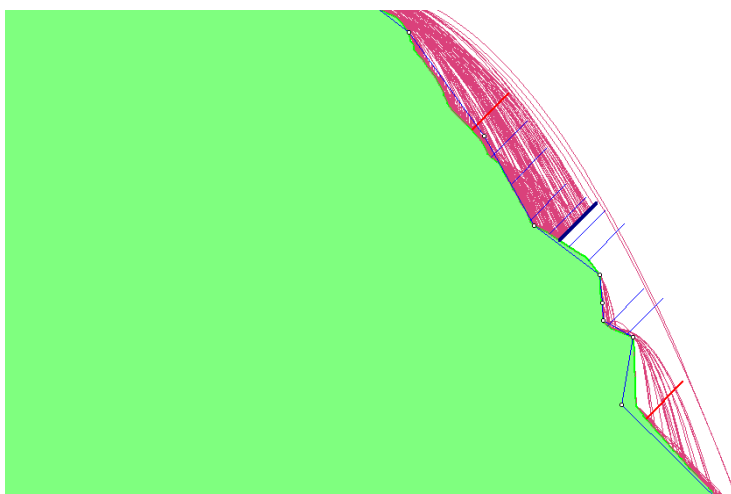


Figura 86 - Detalhe da análise de sensibilidade da primeira barreira com a simulação da queda de blocos

Observando agora a Figura 87, conclui-se que esta localização da barreira oferece uma solução mais segura do que a anterior, pois todos os blocos são parados.

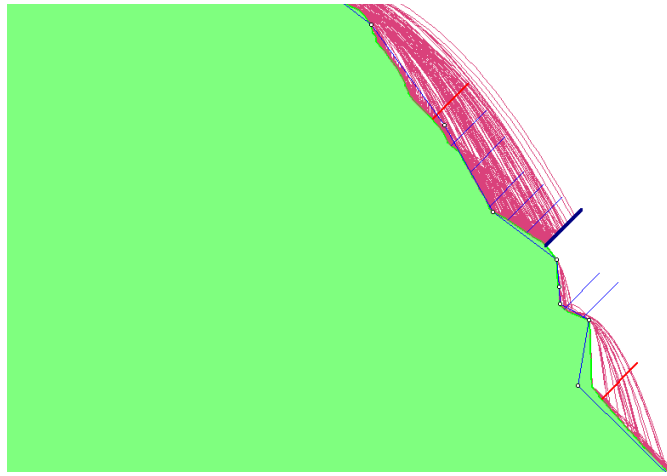


Figura 87 - Localização preferencial da barreira no perfil transversal do talude

A solução foi assim otimizada, não tendo sido necessário alterar a localização da barreira manualmente e voltar a correr os resultados.

Foi feita uma análise de sensibilidade também para a segunda barreira, de modo a encontrar uma solução que oferecesse retenção da totalidade dos blocos, neste caso variando a inclinação (Figura 88). Tal como no caso anterior, foram considerados dez casos.

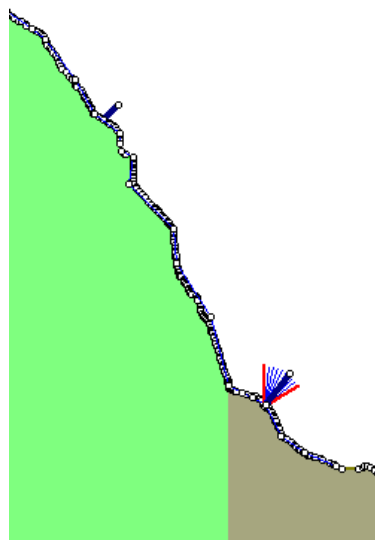


Figura 88 - Análise de sensibilidade da segunda barreira: inclinação

Pela observação da Figura 89, verifica-se que, com o aumento da inclinação da barreira, é possível intersestar mais trajetórias dos blocos.

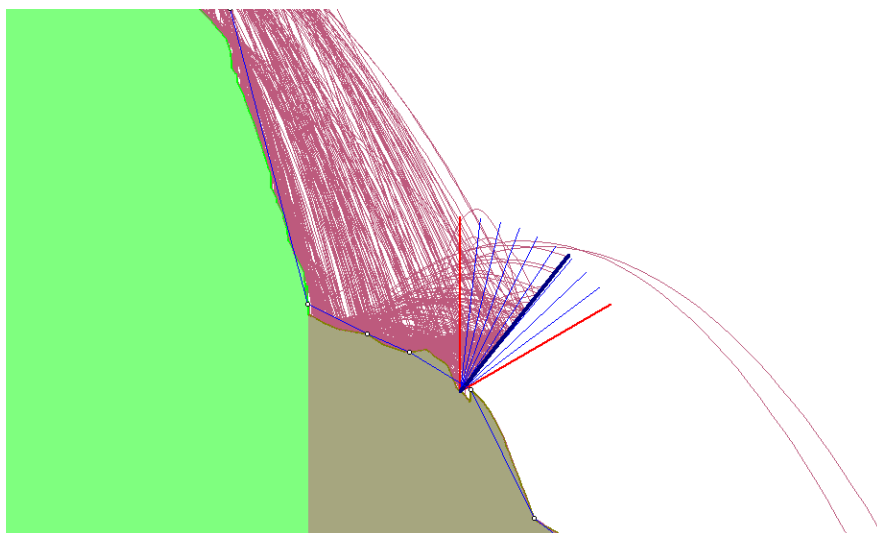


Figura 89 - Detalhe da análise de sensibilidade da segunda barreira com a simulação da queda de blocos

Foi escolhida a terceira posição acima da barreira, cujo resultado se apresenta na Figura 90.

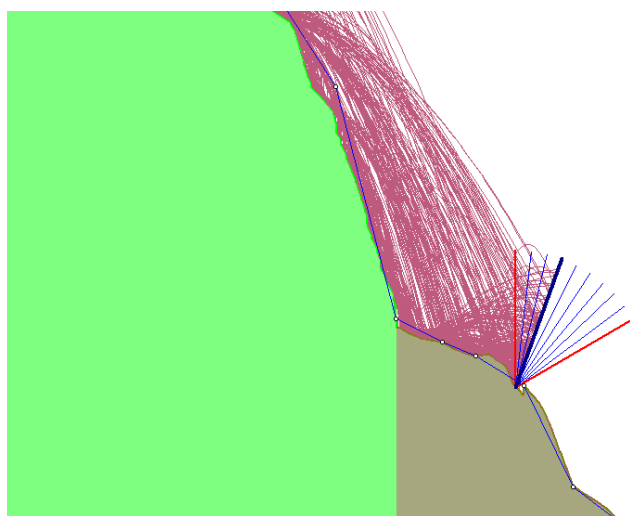


Figura 90 - Inclinação preferencial da segunda barreira

Com a nova inclinação da barreira obtém-se uma solução de proteção mais segura que consegue deter todos os blocos.

A Figura 91 mostra as duas soluções otimizadas através das análises de sensibilidade; apesar de serem lançados mil blocos, as barreiras conseguem interetá-los, oferecendo uma solução de proteção segura.

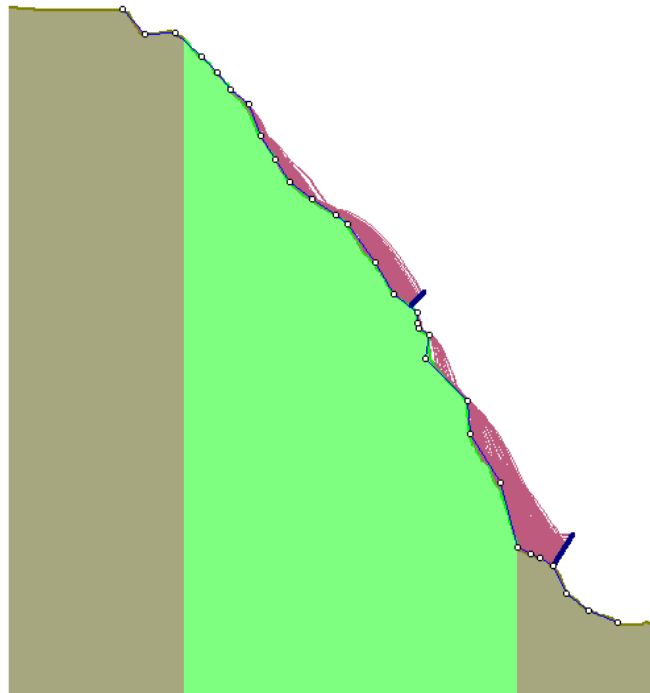


Figura 91 - Solução otimizada para o caso de mil blocos desprendidos

6.3.7. ANÁLISE COM O MODELO DO CORPO RÍGIDO

Nesta secção são apresentados os resultados de simulações da queda de blocos com o modelo do corpo rígido, para avaliar a influência na trajetória dos blocos do método de análise usado.

No Quadro 8 são sintetizados os valores atribuídos às propriedades do material constituinte do talude. Os valores do coeficiente de restituição mantiveram-se, enquanto que o coeficiente de resistência ao rolamento foi assumido em função da tabela de valores deste parâmetro que se encontra na Figura 43 no capítulo anterior. Quanto ao coeficiente de atrito dinâmico, este é calculado através do ângulo de atrito, como já foi mencionado: $\phi=30^\circ$, logo $\tan(\phi) = 0.58$. A ambos os parâmetros foram associadas distribuições normais para simular a sua variação.

Quadro 8 - Propriedades do talude introduzidas no programa para a simulação através do modelo *rigid body*

Propriedades do talude			
coeficiente de restituição		coeficiente de atrito dinâmico	coeficiente de resistência ao rolamento
normal	tangencial		
0.35	0.85	0.58	0.55

Na Figura 92 são apresentadas duas simulações da queda de cem blocos no talude em estudo, uma com o método de análise da massa concentrada e outra com o corpo rígido. Observam-se algumas diferenças nas trajetórias dos blocos, mas no geral a envolvente é semelhante nos dois casos.

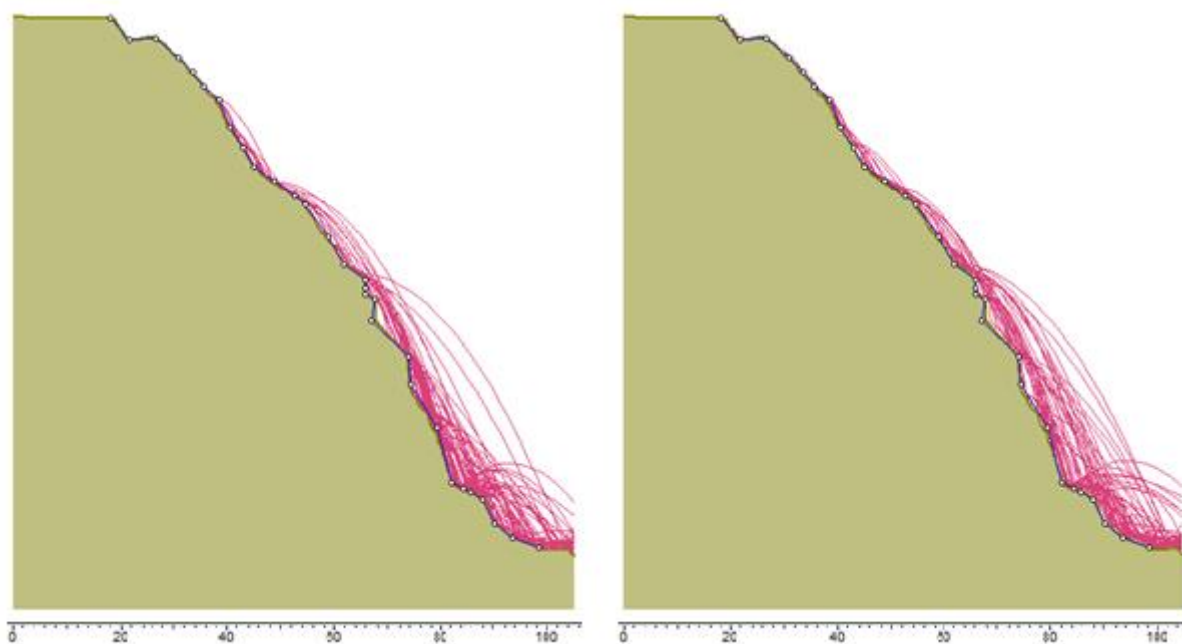


Figura 92 - Comparação das trajetórias dos blocos em função do método de análise; esquerda - *lumped mass*; direita - *rigid body*

Analisando agora o gráfico presente na Figura 93, verifica-se que em grande parte da trajetória dos blocos, as alturas de ressalto são próximas; porém, a partir dos 70 metros, aproximadamente, a distribuição das alturas pelo método do corpo rígido (linha a vermelho) sofre uma subida, atingindo valores superiores aos obtidos através do modelo da massa concentrada (azul). Tal como foi referido no capítulo anterior, a forma dos blocos influencia a sua trajetória pois ao haver uma distância entre a superfície do talude e o centro de gravidade do bloco, este consegue atingir zonas mais afastadas do pé do talude. Do mesmo modo, ao ser contabilizada a forma dos blocos, a energia cinética sofre um aumento devido à energia rotacional e é considerado um mecanismo de atrito que também influencia a energia cinética de rotação.

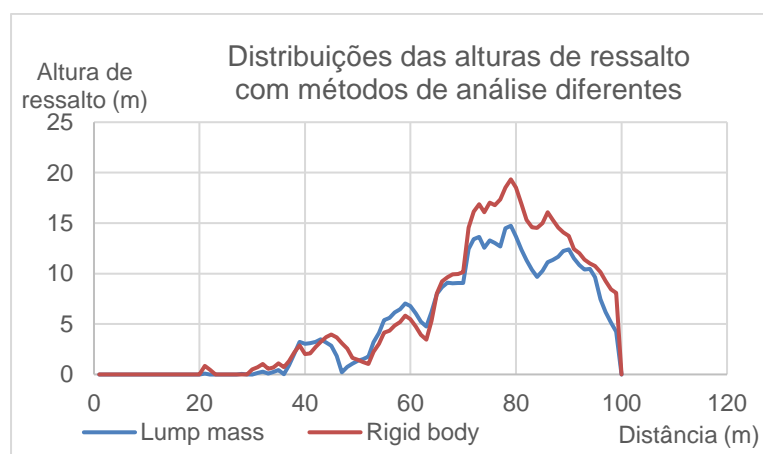


Figura 93 - Distribuições das alturas de ressalto com métodos de análise diferentes

Em relação às distribuições de energia cinética, observa-se que são também aproximadas, à exceção de algumas diferenças nos níveis de energia máximos (Figura 94).

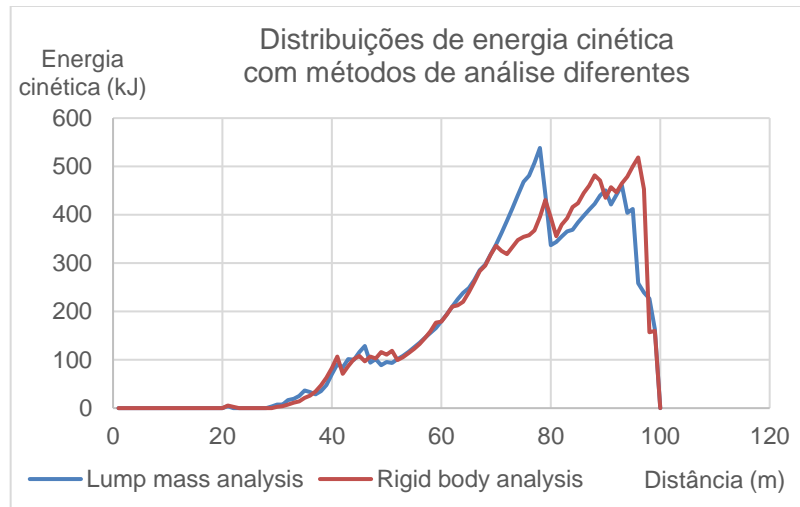


Figura 94 - Distribuições de energia cinética com métodos de análise diferentes

Quanto à solução para este caso, devido à altura de ressalto máxima ser mais elevada do que no caso da análise com o modelo da massa concentrada, a altura da segunda barreira terá de ser maior. Uma barreira de 9 metros seria suficiente para reter todos os blocos em queda, como se mostra na Figura 95.

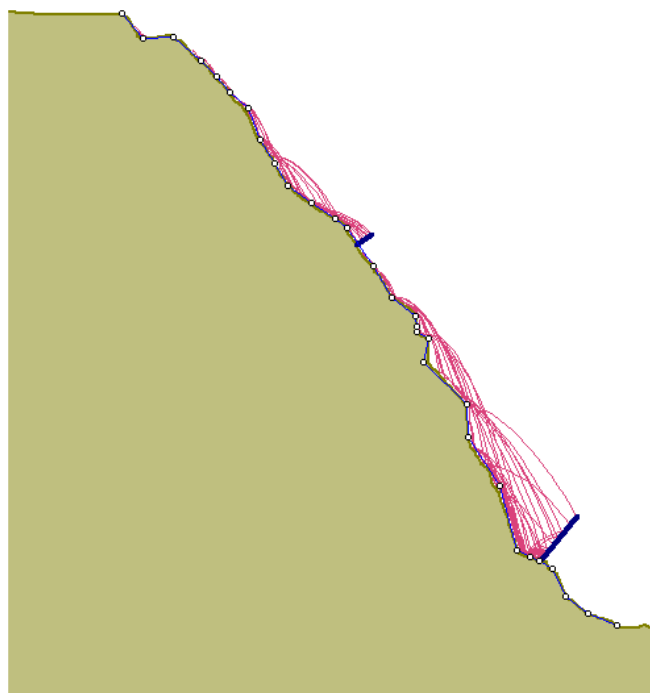


Figura 95 - Solução para a simulação com o método de análise *rigid body*

Uma alternativa a esta solução seria instalar a segunda barreira numa cota mais baixa, pois na zona inferior do perfil do talude as alturas de ressalto são menores (Figura 92). Verifica-se que uma barreira de 7 metros é suficiente para interceptar a totalidade das trajetórias dos blocos (Figura 96). Posteriormente será avaliada a viabilidade desta solução.

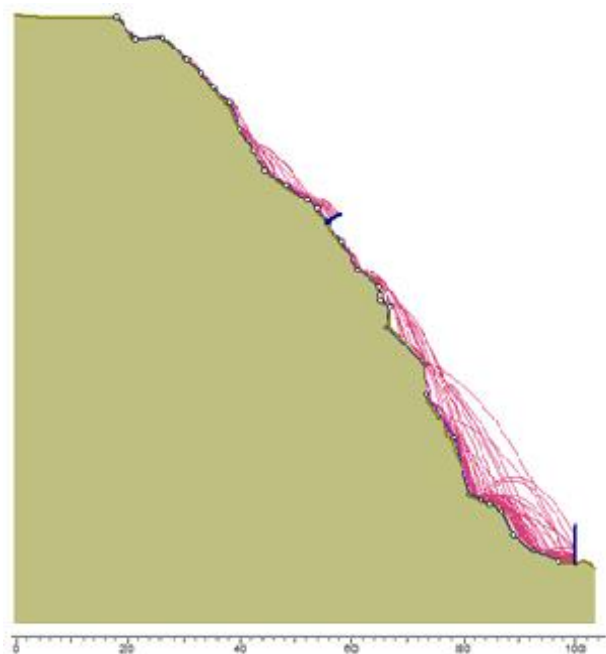


Figura 96 - Alternativa de solução para a simulação com o método de análise *rigid body*

6.3.7.1. Blocos esféricos e cúbicos

De modo a entender a influência da forma dos blocos nas suas trajetórias, foi feita uma simulação com recurso à função que o método de análise *rigid body* permite, que consiste em atribuir formas variadas aos blocos desprendidos. Foi feita uma simulação com blocos cúbicos, e os resultados foram comparados com o caso dos blocos esféricos. Esta análise aumenta bastante o tempo de computação do programa, pois os cálculos das energias e alturas de ressalto não são feitos da mesma maneira que no caso de blocos esféricos. O programa permite a atribuição de mais do que uma forma na mesma simulação; neste caso foi atribuída a todos os blocos uma forma cúbica. Os resultados são apresentados na Figura 97.

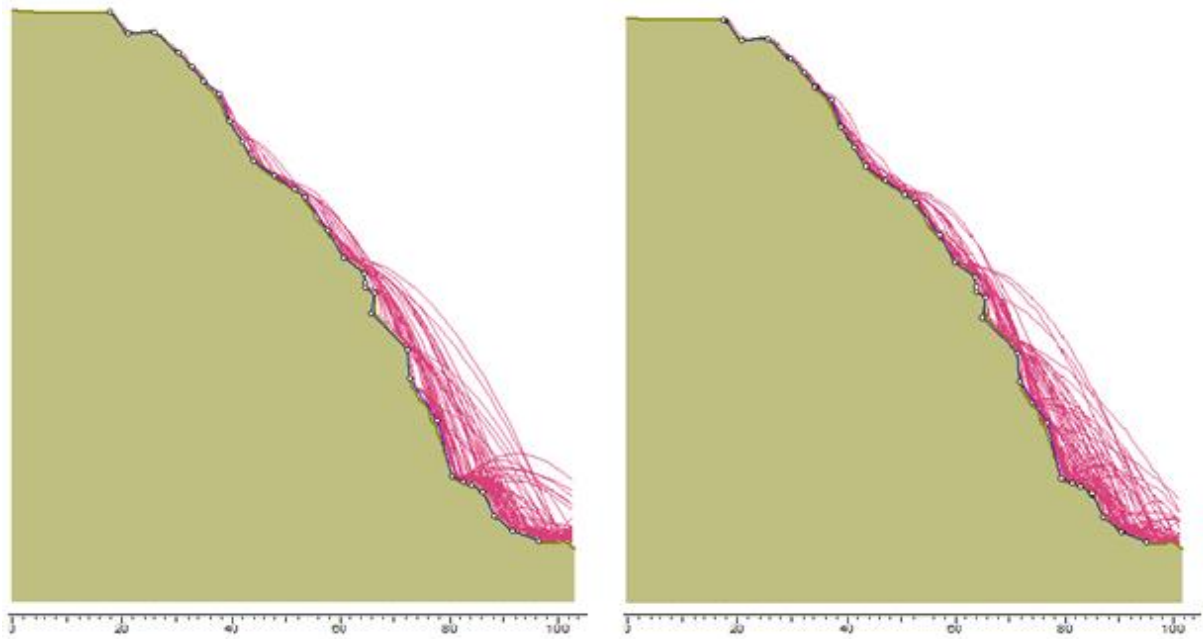


Figura 97 - Comparação das trajetórias dos blocos em função da forma dos blocos; esquerda - blocos esféricos; direita - blocos cúbicos

Pela observação da imagem não se distinguem diferenças significativas entre as duas simulações. No entanto, analisando os gráficos das Figuras 98 e 99, verifica-se que as alturas de ressalto são bastante próximas nos dois casos, porém a linha dos blocos cúbicos (vermelha) aparenta estar um pouco acima da linha dos blocos esféricos na maior parte do trajeto. No caso das energias, acontece o contrário; a linha dos blocos esféricos (azul) encontra-se acima da linha dos blocos cúbicos em quase todo o gráfico.

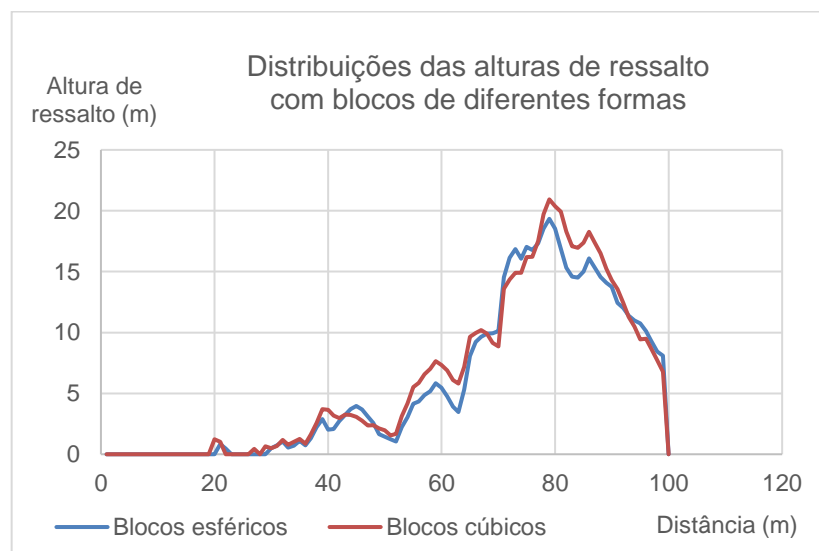


Figura 98 - Distribuições das alturas de ressalto com blocos de diferentes formas

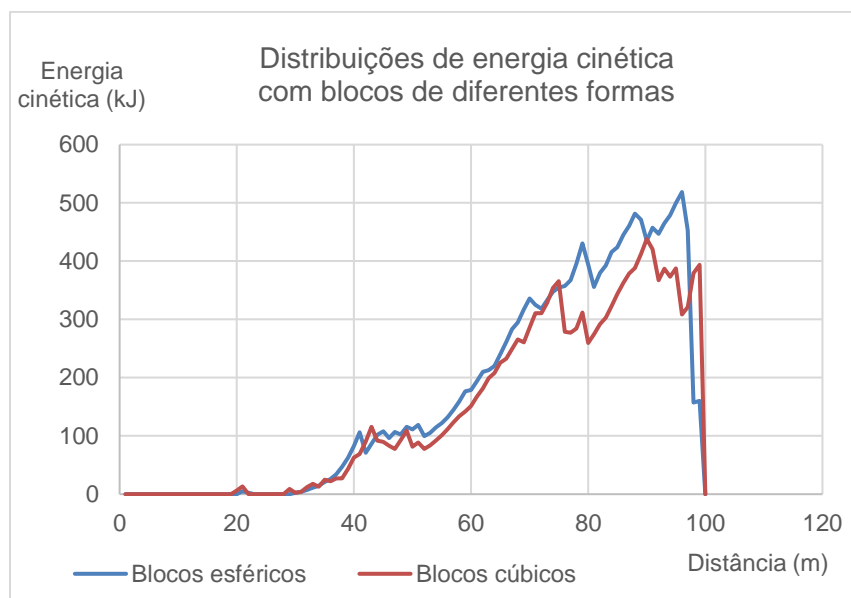


Figura 99 - Distribuições de energia cinética com blocos de diferentes formas

Com base na análise dos gráficos anteriores, seguem-se algumas observações: em relação às alturas de ressalto atingidas pelos blocos, observa-se que as alturas correspondentes aos blocos cúbicos são ligeiramente superiores às correspondentes aos blocos esféricos ao longo da trajetória, verificando-se uma diferença de cerca de 1.5 metros entre os dois valores máximos (aproximadamente nos 80 metros). Isto pode ser explicado pelo facto de blocos angulares terem tendência a saltar enquanto que blocos mais redondos tendem a rolar sobre a superfície do talude. Supondo que um bloco cúbico choca contra o talude segundo um dos seus vértices, o mesmo terá tendência a ressaltar da face do talude; porém, se chocar segundo a superfície de uma das suas faces, irá perder mais energia no impacto e não irá ressaltar tanto. Considerando agora um bloco esférico, quando este embate no talude tem mais tendência a rolar do que a ressaltar, dependendo também da velocidade de rotação que possui antes do choque. Quanto à energia cinética, os blocos esféricos atingem maiores energias do que os cúbicos, o que se pode dever ao facto de a forma esférica ser a que provoca maior momento de inércia, logo a energia cinética de rotação será maior.

Quanto à solução de proteção para o caso dos blocos cúbicos, concluiu-se que a solução utilizada no caso anterior (uma barreira de 3 metros e outra de 9 metros) também pode ser utilizada no caso de os blocos serem cúbicos (Figura 100).

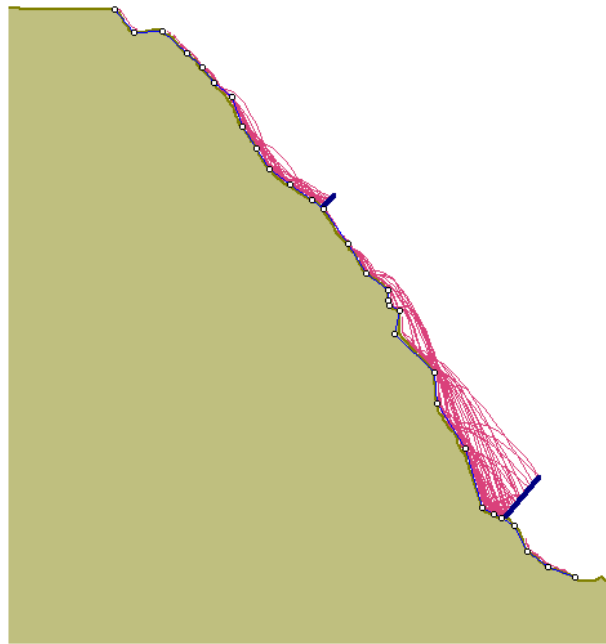


Figura 100 - Simulação da solução para o caso de blocos cúbicos

6.4. VERIFICAÇÃO DA SOLUÇÃO

Uma das funções que o programa oferece é a função de *Barrier report*, que permite gerar um relatório que apresenta a verificação do dimensionamento da barreira com base em três parâmetros: capacidade energética, altura e alongamento. Para gerar o relatório são introduzidos parâmetros como a distância da barreira à infra estrutura a proteger e a altura livre da barreira (parte superior da barreira onde não se pretenda que os blocos atinjam), se aplicável. Para a solução ser considerada como válida, os três parâmetros têm de ser cumpridos: a energia cinética dos blocos tem de ser menor do que a capacidade da barreira (depende se for dimensionada para o estado limite último ou de serviço); a altura atingida pelos blocos tem de ser menor do que a altura máxima da barreira; finalmente, o alongamento ou deformação da barreira tem de ser menor do que a distância à infra estrutura a proteger.

Foram gerados relatórios para as duas barreiras do primeiro caso, para o estado limite de serviço, cujos resultados se apresentam nas Figuras 101 e 102.

Verification		
Energy	77.51 <= 186.00	Valid
Height	2.42 <= 3.00	Valid
Elongation	2.70 <= 50.00	Valid

Figura 101 - Verificação da primeira barreira (de cota superior) para o estado limite de serviço

Verification		
Energy	293.42 <= 3149.00	Valid
Height	6.41 <= 8.00	Valid
Elongation	5.60 <= 10.00	Valid

Figura 102 - Verificação da segunda barreira (de cota inferior) para o estado limite de serviço

Conclui-se assim que esta solução é satisfatória, pois todos os parâmetros são considerados válidos no relatório gerado pelo programa.

De seguida apresentam-se algumas soluções, para os casos estudados anteriormente, que foram consideradas inválidas.

No caso de os blocos terem massa de 5000 kg, a energia cinética atingida pelos mesmos é bastante mais elevada do que para o caso base. Logo, para aguentar a energia dos blocos com massa de 5000 kg teria de ser colocada uma barreira do tipo RB 1500 da Maccaferri, com capacidade energética de 525 kJ em estado limite de serviço; a altura mínima desta barreira é de 4 metros, logo seria mais alta do que o necessário, devido à escolha das barreiras estar limitada às existentes no mercado. A verificação para esta barreira é representada na Figura 103.

Verification		
Energy	387.55 > 186.00	Invalid
Height	2.74 <= 3.00	Valid
Elongation	2.70 <= 50.00	Valid

Figura 103 - Verificação da primeira barreira (de cota superior) para o caso da massa dos blocos igual a 5000 kg

No caso da análise realizada com o modelo do corpo rígido, verificou-se que a solução exposta na Figura 96 não pode ser adotada devido ao facto de o alongamento da barreira de cota inferior ser maior do que a distância à zona a proteger (cerca de 4 metros), como se mostra na Figura 104.

Verification		
Energy	151.20 <= 1725.00	Valid
Height	3.75 <= 7.00	Valid
Elongation	5.30 > 4.00	Invalid

Figura 104 - Verificação da segunda barreira (de cota inferior) para o método de análise do corpo rígido

6.5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Após a realização dos estudos paramétricos para o caso de estudo foi possível tirar algumas conclusões acerca dos parâmetros de que depende a trajetória dos blocos.

Em primeiro lugar, para o talude em estudo, a solução é bastante dispendiosa, tanto em termos de custo das barreiras como em custos de instalação das mesmas. A segunda barreira, em todos os casos simulados, tem no mínimo uma altura de seis metros, que já é uma altura considerável, sendo que em algumas das soluções propostas esta altura chega até aos 9 metros, que é o valor máximo para a altura de barreiras flexíveis existentes no mercado. Isto deve-se principalmente à geometria do talude, considerando a elevada inclinação que possui em algumas secções do seu perfil transversal; é também possível observar que nas cotas inferiores do talude ocorreu já desabamento de massa rochosa. Esta configuração provoca trajetórias de blocos mais afastadas da face do talude, ou seja, alturas de ressalto e energias cinéticas maiores. As irregularidades (saliências e reentrâncias) da face do talude em estudo também contribuem para que o alcance dos blocos seja maior. O facto de o maciço não ser muito fraturado e ter relativamente pouca vegetação a revesti-lo resultam também em resultados piores e soluções dispendiosas.

Em relação à influência que cada parâmetro tem na trajetória e distribuições de energia cinética dos blocos, foi possível tirar também algumas conclusões:

- o coeficiente de restituição é dos parâmetros que mais influencia a trajetória dos blocos em queda, especialmente a sua componente normal, que, se tiver um valor elevado, pode provocar alturas de ressalto muito altas. O coeficiente de restituição tangencial é também um parâmetro importante no fenómeno do desprendimento de blocos, sendo que o seu valor é geralmente elevado no caso de maciços rochosos, podendo atingir valores bastante próximos da unidade, em maciços de rocha intacta.
- o ângulo de atrito, por outro lado, tem uma pequena influência no movimento dos blocos desprendidos; conclui-se que, para valores distintos deste parâmetro, apenas se verificam pequenas diferenças nas distribuições de energia cinética e alturas de ressalto.
- a massa dos blocos é também um parâmetro com importância, pois apesar de na simulação do programa as trajetórias não serem alteradas, a energia cinética dos blocos depende diretamente desta característica, o que significa que, quanto maior o tamanho dos blocos (e consequentemente maior a sua massa), mais robustas terão de ser as barreiras, logo mais custosas. Do mesmo modo, a densidade tem um peso na energia atingida pelos blocos, visto que quanto maior for a densidade maior será a massa. Por exemplo, se dois maciços rochosos de densidades diferentes formarem blocos de volume idêntico, a queda de um bloco do maciço mais denso resultará em piores resultados.
- em relação à forma dos blocos, através da análise pelo método do corpo rígido, verificaram-se diferenças entre blocos esféricos e cúbicos, nomeadamente maiores energias atingidas pelos blocos esféricos e alturas de ressalto máximas superiores da parte dos blocos cúbicos.

Em relação às soluções adotadas para cada caso de estudo, segue-se uma síntese das barreiras dinâmicas escolhidas (Quadro 9) que diferem da solução base (apresentada em 6.2.2.) para o primeiro caso, que consiste numa barreira do tipo RMC 050 ICAT/2, com 3 metros e uma capacidade de 500 kJ, e numa segunda barreira do tipo RMC 850/A, com 8 metros e uma capacidade de 8600 kJ.

Quadro 9 - Síntese das soluções de proteção

Estudo paramétrico	Solução de barreiras	Observações
$R_n = 0.45$	RMC 050 ICAT/2 - 3 metros RMC 850/A - 8 metros (Maccaferri)	A segunda barreira é colocada numa cota inferior, mas ocorre desprendimento de alguns blocos abaixo da barreira; isto pode ser resolvido através da instalação de uma rede metálica
$R_t = 0.9$	RMC 050 ICAT/2 - 3 metros RMC 300/A - 6 metros (Maccaferri)	Nesta solução existe uma probabilidade de 1% de os blocos ultrapassarem a segunda barreira; se este valor não for aceite então poderá ser utilizada a solução base
$R_t = 0.8$	AXI-050 - 3 metros RXI-500 - 9 metros (Geobrugg)	Visto que a instalação de duas barreiras de empresas diferentes não é viável, devem ser escolhidas barreiras da mesma empresa; optou-se por duas barreiras da Geobrugg
Ângulo de atrito	RMC 050 ICAT/2 - 3 metros RMC 850/A - 8 metros (Maccaferri)	Para qualquer valor do ângulo de atrito, verificou-se que a solução base era suficiente para garantir as condições de segurança
Massa = 5000 kg	RB 1500 - 4 metros RMC 850/A - 8 metros (Maccaferri)	Devido às elevadas energias atingidas pelos blocos com massa de 5000 kg, a primeira barreira precisa de uma capacidade mais elevada; a altura de 4 metros deve-se ao facto de a barreira com esta capacidade ter uma altura mínima de 4 metros
Presença de vegetação	RMC 050 ICAT/2 - 3 metros RMC 300/A - 6 metros (Maccaferri)	A presença de vegetação permite a escolha de uma solução mais económica, sem haver risco de os blocos transporem as barreiras
Rigid body analysis (blocos esféricos)	AXI-050 - 3 metros RXI-500 - 9 metros (Geobrugg)	Devido ao facto de a simulação pelo modelo do corpo rígido originar alturas de ressalto mais altas dos blocos, a segunda barreira tem uma altura de 9 metros
Rigid body analysis (blocos cúbicos)	AXI-050 - 3 metros RXI-500 - 9 metros (Geobrugg)	Apesar de provocarem alturas de ressalto e energias diferentes do caso de blocos esféricos, a mesma solução pode ser adotada

7

CONCLUSÃO

Depois de finalizado o trabalho desenvolvido é importante referir algumas observações acerca da matéria abordada na presente dissertação.

De modo a ser possível retirar algumas conclusões sobre este assunto, foi feita uma pesquisa extensiva sobre o mesmo, nomeadamente sobre as características de maciços rochosos, tipos e métodos de estabilização de taludes, e um estudo sobre os elementos e fatores que podem despoletar e de que depende este tipo de instabilidade.

O fenómeno da queda de blocos é praticamente impossível de prever corretamente, devido à quantidade e variedade de informação de que necessita (características físicas e mecânicas do maciço rochoso, tamanho e forma dos blocos, local exato de onde os blocos se desprendem, entre outros) e à multiplicidade e aleatoriedade de casos que se podem desenvolver num único talude.

Foi usado o programa *Rocfall* para simular as trajetórias de blocos que se desprendem ao longo do talude em estudo e para encontrar uma possível solução de proteção com recurso a barreiras flexíveis. Foram atribuídos valores às diferentes variáveis envolvidas no processo do desprendimento de blocos, com base em informação recolhida no local e estimativas baseadas em valores conhecidos. Foram feitas análises paramétricas para avaliar a influência de cada uma dessas variáveis. Com base nos resultados destes estudos foi possível retirar algumas conclusões.

O coeficiente de restituição é o parâmetro que mais influencia o comportamento dos blocos depois de estes se desprenderem do maciço, pois este é uma medida da quantidade de energia que os blocos perdem nos momentos de contacto com o talude. Um talude com um menor coeficiente de restituição, por exemplo, composto por um maciço bastante fragmentado, coberto com vegetação extensa ou com detritos acumulados na sua superfície, terá capacidade de absorver mais energia dos blocos, e, consequentemente, reduzir a altura de ressalto dos mesmos, atenuando o seu efeito prejudicial.

Em relação ao ângulo de atrito, após terem sido realizadas simulações para diferentes valores deste parâmetro, concluiu-se que a sua influência na trajetória dos blocos é reduzida, fazendo variar as alturas de ressalto e energia cinética dos blocos apenas em pequena escala, não tendo sido possível estabelecer uma relação entre estas variações e os valores do ângulo de atrito, no caso estudado.

A massa dos blocos é uma propriedade que influencia também o comportamento dos mesmos, e consequentemente a solução de barreiras flexíveis, pois a massa relaciona-se com a energia cinética, havendo uma proporcionalidade direta entre as duas grandezas.

Através do método de análise do corpo rígido disponível no programa, concluiu-se que a forma dos blocos tem influência na trajetória dos mesmos, devido às diferenças nos momentos de inércia e comportamento do bloco durante o impacto com o talude.

Concluiu-se também que a presença de vegetação é bastante benéfica, conduzindo a uma solução de proteção mais ligeira, e possivelmente mais económica, do que no caso de o talude não ter qualquer revestimento vegetal.

Apesar de este programa ser bastante completo, em termos da informação que utiliza nos cálculos e dos dados que fornece sobre a queda de blocos, facilitando assim o dimensionamento de estruturas protetoras, é também limitado devido ao facto de simular as trajetórias em duas dimensões; deste modo, uma dimensão do movimento dos mesmos é completamente negligenciada. Isto não acontece na prática, devido às irregularidades do terreno em taludes naturais, que faz com que o movimento dos blocos se possa desenvolver em qualquer direção. O conhecimento do historial da queda de blocos de um talude, assim como o perfil tridimensional do terreno, são então boas ferramentas para se conseguir simular uma trajetória dos blocos mais fiel à realidade, de modo a não comprometer a eficácia das soluções dimensionadas.

Tendo em conta que nem sempre é possível obter o perfil em três dimensões do talude, assim como o historial da queda de blocos num talude, seria adequado analisar estes problemas em programas de simulação da queda de blocos em três dimensões. Estes programas têm o inconveniente de a interpretação dos resultados ser bastante difícil, assim como a sua modelação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASTERIOU, P; SAROGLU, H; TSIAMBAOS, G (2012) - Geotechnical and kinematic parameters affecting the coefficients of restitution for rock fall analysis. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences [Em linha]. 54: ISSN 1365-1609.
- BARTON, Nick (1978) - Suggested methods for the quantitative description of discontinuities in rock masses. ISRM, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts [Em linha]. 15:6.
- BELL, Fred G (2003) - Geological hazards: their assessment, avoidance and mitigation. CRC Press. ISBN 0415318513.
- DUFFY, John D (1992) - Flexible wire rope rockfall nets. Transportation Research Record [Em linha]. 30-30. ISSN 0361-1981.
- GONZÁLEZ DE VALLEJO, Luis I [et al.] (2002) - Ingeniería geológica. Pearson Educación. ISBN 8420531049.
- GOODMAN, Richard E (1989) - Introduction to rock mechanics. Wiley New York.
- HIGHLAND, Lynn; BOBROWSKY, Peter T (2008) - The landslide handbook: a guide to understanding landslides. US Geological Survey Reston.
- HUDSON, John A; HARRISON, John P (2000) - Engineering rock mechanics: an introduction to the principles. Elsevier. ISBN 0080530966.
- LIMA, Celso; MENEZES, José Eduardo; TOPA GOMES, António (2012) - Textos de apoio de Geologia de Engenharia. FEUP [Em linha].
- LUIS FONSECA, RJ (2010) - Aplicación de membranas flexibles para la prevención de riesgos naturales. Geobruigg Ibérica, SA. ISBN 8461360184.
- MATOS FERNANDES, Manuel (2006) - Mecânica dos solos: conceitos e princípios fundamentais. FEUP edições. ISBN 9727520863.
- MATOS FERNANDES, Manuel (2011) - Mecânica dos Solos Volume 2: Introdução à Engenharia Geotécnica. FEUP Edições [Em linha].
- ORTIGAO, José Alberto R; SAYAO, Alberto (2013) - Handbook of slope stabilisation. Springer Science & Business Media. ISBN 3662076802.
- PECKOVER, FL; KERR, JWG (1977) - Treatment and maintenance of rock slopes on transportation routes. Canadian Geotechnical Journal [Em linha]. 14:4. 487-507. ISSN 0008-3674.
- PIERSON, Lawrence A; VAN VICKLE, R (1991) - Rockfall hazard rating system. Oregon State Highway Division, Engineering Geology Group.
- PRIEST, Stephen Donald (2012) - Discontinuity analysis for rock engineering. Springer Science & Business Media. ISBN 9401114986.
- RITCHIE, Arthur M (1963) - Evaluation of rockfall and its control. Highway research record [Em linha].17.
- SHEPPARD, Sheri D; TONGUE, Benson H (2005) - Statics: Analysis and Design of Systems in Equilibrium. John Wiley & Sons Incorporated. ISBN 0471372994.
- SINGHAL, Brij Bhusan Saran; GUPTA, Ravi P (2010) - Applied hydrogeology of fractured rocks. Springer Science & Business Media. ISBN 9048187990.
- SOETERS, Robert; VAN WESTEN, Cornelis J (1996) - Landslides: Investigation and mitigation. Chapter 8-Slope instability recognition, analysis, and zonation. Transportation research board special report [Em linha].247. ISSN 030906208X.

VIJAYAKUMAR, S [et al.] (2012) - Effect of rockfall shape on normal coefficient of restitution. 2012. American Rock Mechanics Association.

VIJAYAKUMAR, Sinnathurai; YACOUN, Thamer; CURRAN, John H (2011) - On the effect of rock size and shape in rockfall analyses. 2011.

VOLKWEIN, Axel [et al.] (2011) - Rockfall characterisation and structural protection-a review. Natural Hazards and Earth System Sciences [Em linha]. 11: p. 2617-p. 2651.

WYLLIE, Duncan C (2015) - Rock fall engineering. CRC Press. ISBN 1482219980.

WYLLIE, Duncan C; MAH, Chris (2004) - Rock slope engineering. CRC Press. ISBN 1482265125.

Brasil Escola [Em linha]. [Consult. 2018]. Disponível em WWW: <URL: <https://brasilestola.uol.com.br/geografia/falhas-geologicas.htm>>.

EDP [Em linha]. [Consult. 2018]. Disponível em WWW: <URL: https://a-nossa-energia.edp.pt/centros_produtores/fotos_videos.php?item_id=80&cp_type=§ion_type=fotos_videos>.

Geobru [Em linha]. [Consult. 2018]. Disponível em WWW: <URL: www.geobru.com>.

The Landslide Blog [Em linha]. [Consult. 2018]. Disponível em WWW: <URL: <https://blogs.agu.org/landslideblog/2016/07/28/illgraben-debris-flow-video/>>.

Wikimedia commons [Em linha]. [Consult. 2018]. Disponível em WWW: <URL: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Otira_Rock_Fall_Shelter_%26_Aqueduct.JPG>.

www.encuentra24.com [Em linha]. [Consult. 2018]. Disponível em WWW: <URL: <https://www.encuentra24.com/costa-rica-en/classified-listings-building-construction-building/construccion-muros-de-gaviones/11052032>>.

www.geoverticalsrl.com [Em linha]. [Consult. 2018]. Disponível em WWW: <URL: <http://www.geoverticalsrl.com/en/flexible-net-barriers-against-debris-flows/>>.